



TESIS DOCTORAL

Diseño y desarrollo de una plataforma flexible de simulación para apoyar el diseño y el rediseño de terminales ferroviarias de contenedores

Autora:

Alicia García Hernández

Directora:

Dra. Isabel García Gutiérrez

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

Leganés, octubre 2013



TESIS DOCTORAL

DISEÑO Y DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA FLEXIBLE PARA APOYAR EL DISEÑO Y EL REDISEÑO DE TERMINALES FERROVIARIAS DE CONTENEDORES

Autora: *Alicia García Hernández*

Directora: **Dra. Isabel García Gutiérrez**

Firma del Tribunal Calificador:

Firma

Presidente: Dr. Gil Gutiérrez Casas

Vocal: Dr. José A. Comesaña Benavides

Secretario: Dr. Álvaro García Sánchez

Calificación:

Leganés, 14 de octubre de 2013

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi más profundo agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han contribuido al desarrollo de esta tesis.

En primer lugar, a mi directora de tesis, Isabel García, por sus consejos, sugerencias y dedicación.

A los directivos de ADIF, de RENFE y de DB Schenker con los que he mantenido contacto por su colaboración y asesoramiento.

A Borja, Diego, Jesús y Miguel Ángel por su ayuda con la programación de la plataforma flexible de simulación.

A mis compañeros del Área de Ingeniería de Organización de la Universidad Carlos III de Madrid, a los que están y a los que estuvieron, por su apoyo y amistad.

A mis padres, hermanos y muy especialmente a Jose por haberme escuchado, comprendido, animado, apoyado, valorado, ayudado y querido durante todo este tiempo.

A mis amigas por haber sido una fuente imparable de distracción cuando me ha hecho falta y por entender siempre mis ausencias.

A los compañeros con los que acabé la carrera y también a aquéllos con los que empecé el doctorado por su confianza y empatía.

Por último, a todos aquellos que sin sentirnos identificaros con ninguno de los grupos anteriores habéis tenido hacia mí alguna palabra de esperanza y ánimo durante el desarrollo de este trabajo.

Gracias a todos.

RESUMEN

En las últimas décadas, el transporte intermodal tren-carretera (donde el tren se emplea para trayectos a medias y largas distancias, combinado con la carretera para realizar la etapa inicial y final del transporte) se ha convertido en una alternativa atractiva (desde el punto de vista de la sostenibilidad del transporte) frente al transporte exclusivo de mercancías por carretera. Sin embargo, las medidas aplicadas en Europa por la Comisión Europea y por sus países miembros para potenciar el uso del ferrocarril no han conseguido incrementar su utilización hasta los niveles deseados.

Las terminales ferroviarias juegan un papel importante dentro de una red de transporte intermodal, al ser el lugar donde la mercancía cambia de modo. Es por esto que el estudio de su funcionamiento pueda ser considerado como un aspecto clave para aumentar el atractivo del transporte ferroviario de mercancías.

En esta tesis, se ha aplicado un enfoque modular y flexible para diseñar y desarrollar una herramienta de simulación que pueda ser utilizada por usuarios sin conocimientos de programación para:

- Modelar, de forma fiel a la realidad, rápida y sencilla, una amplia variedad de terminales ferroviarias de contenedores, a partir de la información (relativa a su diseño y operación) introducida por un decisor en una interfaz de usuario.
- Prever la productividad de estas terminales, su nivel de servicio y el uso de sus recursos e infraestructuras dado un plan de trenes.
- Evaluar configuraciones alternativas que permitan mejorar el funcionamiento inicial de las terminales representadas.

El estudio de una serie de casos ha permitido comprobar la utilidad del enfoque aplicado para construir esta herramienta, así como el interés de los resultados que proporciona. Esta herramienta podría ser de gran utilidad para los administradores de infraestructuras ferroviarias y para los operadores ferroviarios, a la hora de tomar de decisiones estratégicas y tácticas relativas, por ejemplo, al diseño de nuevas terminales o al rediseño de terminales existentes para satisfacer nuevas demandas.

En desarrollos futuros, el enfoque aplicado en esta tesis podría extenderse al estudio de otras terminales que han quedado fuera del alcance de este trabajo, como es el caso, por ejemplo, de las terminales marítimas o fluviales.

ABSTRACT

In recent decades, intermodal road-rail transportation (where rail is used in medium and long distances combined with road for the first and last leg of the journey) has turned out to be an attractive alternative (from the point of view of transport sustainability) to freight transport solely by road. Nevertheless, the measures implemented in Europe by the European Commission and by the member countries to foment railway use have not brought about the increase desired.

Railway terminals play an important role within an intermodal transport network, being the location where freight changes mode. For this reason, the study of how they function could be considered a key aspect in increasing the attractiveness of railway freight transport.

In this thesis, a modular and flexible approach has been applied to design and develop a simulation tool that can be employed by users not knowledgeable in programming:

- To model, in a realistic and simple way, a wide variety of rail container terminals based on information (relating to their design and operation) introduced through an user interface.
- To predict the productivity of these terminals, their level of service and the use of their resources and infrastructures considering a railway plan.
- To evaluate alternative configurations which allow improving the initial functioning of the terminals depicted.

The study of a series of cases has demonstrated the utility of the approach applied to develop the simulation tool as well as the interest of its results. This tool could be very useful for railway infrastructure administrators and railway operators when making strategic and tactical decisions related, for example, to the design of new terminals or the redesign of existing terminals to satisfy new demands.

In future work, the approach applied in this thesis could be extended to the study of other terminals which are beyond the scope of this work, such as, for example, maritime or river terminals.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción al problema de estudio	3
1.2. Objetivos	5
1.3. Estructura del documento	6
2. TRANSPORTE FERROVIARIO DE MERCANCÍAS EN EUROPA Y ESPAÑA	9
2.1. Introducción	11
2.2. Situación del transporte ferroviario de mercancías en Europa y España	11
2.2.1. Evolución por modos del transporte de mercancías	11
2.2.2. Transporte ferroviario de mercancías como alternativa al transporte por carretera	17
2.2.3. Medidas para impulsar el transporte ferroviario de mercancías	20
2.3. Agentes del sector ferroviario	25
2.4. Infraestructuras ferroviarias para el transporte de mercancías	27
2.4.1. Terminales ferroviarias	27
2.4.2. Vías	30
2.5. Configuración y servicios de las terminales ferroviarias de contenedores	32
2.5.1. Instalaciones y servicios de las terminales ferroviarias de contenedores	32
2.5.2. Infraestructuras y recursos de las terminales ferroviarias de contenedores	34
2.6. Conclusiones	39
3. CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA DE TRABAJO	41
3.1. Introducción	43
3.2. Antecedentes, origen y presentación del problema de estudio	43
3.3. Alcance, caracterización y nivel de decisión del problema de estudio	46
3.3.1. Alcance	47
3.3.2. Caracterización	48
3.3.3. Nivel de decisión	52
3.4. La simulación como técnica para estudiar terminales ferroviarias de contenedores	56
3.5. Metodología para la consecución de los objetivos de la tesis	61

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN Y ESTUDIO ESPECÍFICO DE TERMINALES FERROVIARIAS DE CONTENEDORES	67
4.1. Introducción	69
4.2. Revisión bibliográfica del estado de la cuestión	70
4.2.1. Literatura revisada	70
4.2.2. Conclusiones sobre el sistema de estudio	82
4.2.3. Conclusiones sobre la originalidad y el interés de la plataforma flexible desarrollada	87
4.3. Entrevistas con expertos españoles en transporte ferroviario de contenedores y visitas a terminales españolas	89
4.4. Análisis de fuentes "on-line" y entrevista con un experto internacional.....	94
 5. MODELO CONCEPTUAL DE LAS TERMINALES A REPRESENTAR CON LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN	 103
5.1. Introducción	105
5.2. Identificación general de las terminales a representar	105
5.3. Detalle de las terminales a representar según sus características de diseño	107
5.3.1. Definición del tipo de recursos y de infraestructuras existentes en las terminales a representar.....	107
5.3.2. Detalle de otras características de diseño a configurar para cada tipo de recurso e infraestructura	112
5.3.3. Terminales a representar según la disposición de sus recursos e infraestructuras	115
5.4. Detalle de las terminales a representar según sus características de operación	117
5.4.1. Entrada/salida de trenes	118
5.4.2. Clasificación de plataformas	121
5.4.3. Almacenamiento de contenedores	123
5.4.4. Descarga/carga de trenes y trabordo de contenedores entre trenes.....	127
5.4.5. Entrada/salida de camiones/tractores con plataforma	130
5.4.6. Carga/descarga de camiones/tractores con plataforma	131
5.5. Relación de las terminales a representar con su entorno.....	132
5.6. Indicadores para medir el funcionamiento de terminales	134
 6. IMPLEMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN	 139
6.1. Introducción	141
6.2. Elementos de la plataforma flexible de simulación	141

6.3. Elección de softwares	142
6.3.1. Elección de software para el modelo de simulación	142
6.3.2. Elección de software para la interfaz de usuario	144
6.3.3. Elección de software para los ficheros de resultados	146
6.4. Prototipos de la plataforma flexible de simulación	147
6.5. Programación del modelo de simulación.....	151
6.5.1. Construcción de modelos usando Witness.....	151
6.5.2. Elementos y módulos del modelo de simulación	158
6.5.3. Configuración de las características de los elementos del modelo	164
6.5.4. Lógica que relaciona los elementos y módulos del modelo	167
6.6. Programación de la interfaz de usuario	170
6.7. Simulación de escenarios con la plataforma flexible de simulación	173
 7. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN	 175
7.1. Introducción	177
7.2. Etapas de verificación y validación dentro de un estudio de simulación	177
7.3. Validación del modelo conceptual de la plataforma flexible de simulación	179
7.4. Verificación de la plataforma flexible de simulación	181
7.5. Validación de resultados de la plataforma flexible de simulación	183
7.5.1. Descripción del sistema a simular y de los resultados a comparar	184
7.5.2. Ajuste de la plataforma flexible de simulación.....	189
7.5.3. Simulación del sistema y comparación de sus resultados con los del sistema real	189
 8. EXPERIMENTACIÓN CON LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN	 195
8.1. Introducción	197
8.2. Metodología de experimentación con la plataforma flexible de simulación	197
8.2.1. Casos y objetivos de estudio.....	197
8.2.2. Metodología para obtener y analizar los resultados de la plataforma flexible	200
8.3. Caso de estudio 1.....	204
8.3.1. Situación inicial.....	206
8.3.2. Situación con demanda incrementada	210
8.4. Caso de estudio 2.....	215

8.4.1.	Situación inicial.....	216
8.4.2.	Alternativas de mejora.....	221
8.5.	Caso de estudio 3.....	226
8.5.1.	Situación inicial.....	228
8.5.2.	Situación con menor demanda	232
9.	CONCLUSIONES, APORTACIONES Y DESARROLLOS FUTUROS.....	237
9.1.	Introducción	239
9.2.	Conclusiones.....	239
9.2.1.	Situación del transporte ferroviario en Europa y España	239
9.2.2.	Simulación como técnica para estudiar terminales ferroviarias de contenedores	239
9.2.3.	Modelos de simulación para apoyar decisiones estratégicas y tácticas relativas a terminales.....	240
9.2.4.	Similitudes y diferencias entre terminales ferroviarias de contenedores.....	241
9.2.5.	Diseño y desarrollo de la plataforma flexible.....	243
9.2.6.	Estudio de escenarios con la plataforma flexible	245
9.2.7.	Conclusión global	246
9.3.	Aportaciones.....	246
9.4.	Desarrollos futuros	248
10.	BIBLIOGRAFÍA	251
ANEXO A.	GLOSARIO	273
ANEXO B.	INFORMACIÓN A CONFIGURAR EN LA INTERFAZ DE USUARIO	279

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Evolución del transporte de pasajeros y de mercancías en la Unión Europea entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).	12
Figura 2.2. Evolución por modos del transporte de mercancías en la Unión Europea entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).	13
Figura 2.3. Evolución del reparto modal del transporte de mercancías en la Unión Europea entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).	13
Figura 2.4. Evolución del reparto modal interior del transporte de mercancías en la Unión Europea entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).	14
Figura 2.5. Evolución por modos del transporte de mercancías en España entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en INE (2012).	14
Figura 2.6. Evolución del reparto modal del transporte de mercancías en España entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en INE (2012).	15
Figura 2.7. Comparativa del reparto modal interior del transporte de mercancías en España y Europa en 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).	16
Figura 2.8. Evolución del consumo final de energía por modos de transporte y emisiones totales de CO ₂ para el transporte de la Unión Europea entre 1995 y 2008. Fuente: adaptación de Eurostat (2011).	16
Figura 2.9. Evolución de los kilómetros en uso de vías ferroviarias y de autopistas en la Unión Europea entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).	17
Figura 2.10. Caja móvil (a la izquierda) y contenedor para transportar carga general (a la derecha). Fuente: ADIF (2012c).	18
Figura 2.11. Toneladas-kilómetro transportadas por modos interiores y países de la Unión Europea en 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).	19
Figura 2.12. Corredores españoles de la red ferroviaria transeuropea de mercancías. Fuente: elaboración propia basada en Ministerio de Fomento (2012c).	24
Figura 2.13. Reparto modal interior del transporte de mercancías por países de la Unión Europea en 2008. Fuente: elaboración propia basada en Eurostat (2012).	28
Figura 2.14. Millones de toneladas transportadas por RENFE Operadora en 2009 y 2010 para cada familia de productos. Fuente: adaptación de RENFE Operadora (2011).	29
Figura 2.15. Millones de toneladas-kilómetro brutas y netas transportadas por RENFE Operadora en 2010 para cada familia de productos. Fuente: adaptación de RENFE Operadora (2011).	29

Figura 2.16. Mapa de anchos de vía en Europa. Fuente: Ministerio de Fomento (2012a).....	31
Figura 2.17. Mapa de vías dobles/únicas y electrificadas/no electrificadas en España. Fuente: ADIF (2012a).	32
Figura 2.18. Sistemas empleados para transportar contenedores sobre trenes. Fuente: adaptación de Ministerio de Fomento (2012a).	33
Figura 2.19. Zonas de almacenamiento de la terminal de Madrid Abroñigal. Fuente: elaboración propia basada en ADIF (2012c).	35
Figura 2.20. Tractor de maniobras. Fuente: ADIF (2012c).	36
Figura 2.21. Plataforma porta contenedores. Fuente: TERCAT (2012).	36
Figura 2.22. Tractor/tractor con plataforma. Fuente: TERCAT (2012).	37
Figura 2.23. Grúa móvil (a la derecha) y grúas pórtico (a la izquierda). Fuente: ADIF (2012c).	37
Figura 2.24. Cargador frontal (a la derecha), cargador lateral (en el centro) y carretilla pórtico (a la izquierda). Fuente: TEREX Cranes (2012).	38
Figura 2.25. Locomotora (a la derecha) y plataforma no bimodal para transportar contenedores (a la izquierda). Fuente: RENFE Operadora (2012a).	38
Figura 3.1. Aspectos en los que pueden diferir unas terminales de otras. Fuente: elaboración propia basada en Günther y Kim (2006).	49
Figura 3.2. Zonas de almacenamiento cerca de las vías de las terminales de Madrid Abroñigal y de La Coruña-San Diego. Fuente: elaboración propia basada en ADIF (2012c).	51
Figura 3.3. Decisiones que permite apoyar la plataforma flexible de simulación desarrollada en esta tesis. Fuente: elaboración propia.	54
Figura 3.4. Técnicas para estudiar un sistema. Fuente: elaboración propia basada en Law (2007).	56
Figura 3.5. Metodología de trabajo. Fuente: elaboración propia.	63
Figura 4.1. Principales terminales ferroviarias de contenedores norteamericanas y rutas de operadores ferroviarios. Fuente: adaptación de IANA (2012).	97
Figura 4.2. Terminales ferroviarias de contenedores europeas recogidas en la web AGORA. Fuente: AGORA (2012).	98
Figura 5.1. Configuración con mayor variedad de recursos y de infraestructuras a representar. Fuente: elaboración propia.	108
Figura 5.2. Recursos e infraestructuras que componen la playa dedicada a cargar/descargar trenes y camiones. Fuente: elaboración propia.	109
Figura 5.3. Diseños básicos de playa de carga/descarga de trenes y camiones a representar. Fuente: elaboración propia.	110
Figura 5.4. Acceso de las grúas móviles a las infraestructuras que están bajo pórtico. Fuente: elaboración propia.	116

Figura 5.5. Layouts alternativos para las playas de carga/descarga de trenes y camiones atendidas sólo por grúas móviles. Fuente: elaboración propia.	117
Figura 5.6. Entrada/salida de trenes en/de la zona de carga/descarga usando las vías de recepción/expedición. Fuente: elaboración propia.	119
Figura 5.7. Entrada/salida de trenes en/de la zona de carga/descarga usando las vías de clasificación. Fuente: elaboración propia.	120
Figura 5.8. Tipo de trenes salientes formados en la zona de clasificación. Fuente: elaboración propia.	122
Figura 5.9. Ejemplo de almacenamiento de contenedores en altura y en superficie. Fuente: elaboración propia.	125
Figura 5.10. Área de trabajo de las grúas pórtico. Fuente: elaboración propia. ...	126
Figura 5.11. Reparto del área de trabajo entre dos grúas pórtico. Fuente: elaboración propia.	128
Figura 5.12. Trasbordo de contenedores entre trenes. Fuente: elaboración propia.	128
Figura 6.1. Definición de elementos en Witness. Fuente: elaboración propia.	155
Figura 6.2. Cuadro de detalle de un elemento "machine". Fuente: elaboración propia.	156
Figura 6.3. Representación gráfica inicial del elemento "Puerta_salida". Fuente: elaboración propia.	157
Figura 6.4. Representación gráfica final del elemento "Puerta_salida". Fuente: elaboración propia.	158
Figura 6.5. Activación y desactivación de módulos. Fuente: elaboración propia...	160
Figura 6.6. Uso de módulos para representar playas de carga/descarga sin grúas pórtico. Fuente: elaboración propia basada en ADIF (2012c), AGORA (2012) y Terminali Italia (2012).	161
Figura 6.7. Uso de módulos para representar playas de carga/descarga con grúas pórtico. Fuente: elaboración propia basada en ADIF (2012c) y AGORA (2012). ..	161
Figura 6.8. Uso de módulos para representar playas de carga/descarga con y sin grúas pórtico. Fuente: elaboración propia basada en AGORA (2012).	162
Figura 6.9. Configuración del número de grúas móviles. Fuentes: elaboración propia.	165
Figura 6.10. Configuración del nombre de la interfaz de usuario. Fuente: elaboración propia.	165
Figura 6.11. Configuración de turnos de trabajo y tasas de averías. Fuente: elaboración propia.	166
Figura 6.12. Acceso de grúas móviles a módulos de carga/descarga. Fuente: elaboración propia.	168
Figura 6.13. Acceso de tractores de maniobra a zonas de una terminal. Fuente: elaboración propia.	169

Figura 6.14. Interfaz de usuario. Fuente: elaboración propia.....	170
Figura 6.15. Generación de ficheros a partir de la interfaz de usuario. Fuente: elaboración propia.	171
Figura 6.16. Utilidades implementadas para evitar errores en la entrada de datos. Fuente: elaboración propia.	173
Figura 7.1. Etapas de verificación y de validación dentro de un estudio de simulación. Fuente: elaboración propia basada en Banks et al. (2001), Law (2007) y Sargent (2010).....	178
Figura 7.2. Llegada/salida de trenes y de camiones durante el tiempo de calentamiento y durante el período de estudio. Fuente: elaboración propia.....	190
Figura 7.3. Número de camiones que esperan antes de entrar (a la izquierda) y número máximo de camiones que esperan antes de entrar (a la derecha). Fuente: elaboración propia.	193
Figura 8.1. Caso 2- Origen/destino de los trenes y de los lotes de plataformas que entran/salen en/de las zonas de clasificación y de carga/descarga. Fuente: elaboración propia.	218
Figura 8.2. Caso 2 – Dobles manipulaciones en la playa de almacenamiento. Fuente: elaboración propia.	225

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1. Rango de variación para las características de diseño relativas a los recursos y a las infraestructuras de las terminales ferroviarias a representar. Fuente: elaboración propia.	113
Tabla 6.1. Evaluación de interfaces de usuario. Fuente: elaboración propia.	145
Tabla 7.1. Calendario de entrada, descarga, carga y salida de trenes. Fuente: elaboración propia.	187
Tabla 7.2. Resultados para cada variable de salida tras simular diez repeticiones. Fuente: elaboración propia.	192
Tabla 7.3. Fórmulas para calcular la desviación y el coeficiente de variación. Fuente: elaboración propia basada en Banks (1998) y Law (2007).	192
Tabla 8.1. Principales diferencias que existen entre los escenarios a analizar en los casos de estudio. Fuente: elaboración propia.	198
Tabla 8.2. Fórmula para calcular el intervalo de confianza para la media de una variable de salida. Fuente: elaboración propia basada en Banks (1998) y Law (2007).	202
Tabla 8.3. Fórmulas para calcular z y el intervalo de confianza "paired-t" para la media de z. Fuente: elaboración propia basada en Banks (1998) y Law (2007). ..	203
Tabla 8.4. Caso 1 – Plan de trenes inicial. Fuente: elaboración propia.	206
Tabla 8.5. Caso 1 – Indicadores de funcionamiento para la situación inicial (tiempos en minutos, proporciones y utilizaciones en porcentaje). Fuente: elaboración propia.	208
Tabla 8.6. Caso 1 – Plan de trenes con demanda incrementada. Fuente: elaboración propia.	210
Tabla 8.7. Caso 1 – Comparación de indicadores para las configuraciones 2-1 (tiempos en minutos, proporciones y utilizaciones en porcentaje). Fuente: elaboración propia.	214
Tabla 8.8. Caso 2 – Plan de trenes. Fuente: elaboración propia.	217
Tabla 8.9. Caso 2 – Longitud de los trenes entrantes/salientes (en nº de plataformas de 60 pies y metros) y número de plataformas que cada tren entrante entrega a cada tren saliente. Fuente: elaboración propia.	218
Tabla 8.10. Caso 2 – Indicadores de funcionamiento para la configuración 1 y comparación de indicadores para las configuraciones 2-1 y 3-1 (tiempos en minutos, proporciones y utilizaciones en porcentaje). Fuente: elaboración propia.	220
Tabla 8.11. Caso 2 – Indicadores de funcionamiento para la configuración 3 y comparación de indicadores para las configuraciones 4-3 (tiempos en minutos, proporciones y utilizaciones en porcentaje). Fuente: elaboración propia.	226
Tabla 8.12. Caso 3 – Plan de trenes inicial. Fuente: elaboración propia.	228
Tabla 8.13. Caso 3 – Asignación inicial de trenes a playas de carga/descarga. Fuente: elaboración propia.	229

Tabla 8.14. Caso 3 – Indicadores de funcionamiento para la configuración 1 y comparación de indicadores para las configuraciones 2-1 (tiempos en minutos, proporciones y utilizaciones en porcentaje). Fuente: elaboración propia.231

Tabla 8.15. Caso 3 – Plan de trenes con menor demanda. Fuente: elaboración propia.232

Tabla 8.16. Caso 3 – Indicadores de funcionamiento para la configuración 2 y comparación de indicadores para las configuraciones 3-2 (tiempos en minutos, proporciones y utilizaciones en porcentaje). Fuente: elaboración propia.235

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN AL PROBLEMA DE ESTUDIO

El transporte de mercancías en Europa ha experimentado un fuerte crecimiento, llegando a convertirse en una actividad crítica para las empresas tras los cambios económicos y productivos experimentados en las últimas décadas.

Los nuevos flujos de carga se han repartido de forma desequilibrada entre los distintos modos de transporte, siendo la carretera el modo más utilizado, a pesar de las externalidades que presenta (congestión, siniestralidad, contaminación, etc.).

La Comisión Europea, seguida de organismos nacionales como el Ministerio de Fomento español, está promoviendo diversas medidas para transferir parte de la carga transportada por carretera a otros modos (ferrocarril, fluvial o marítimo), con el objetivo de garantizar un sistema de transporte sostenible a largo plazo. En el caso del ferrocarril, se pretende combinar este modo con la carretera, de tal forma que el ferrocarril se utilice para transportes a medias y largas distancias y la carretera para la etapa inicial y final del transporte.

A pesar de los beneficios que conlleva el transporte intermodal tren-carretera, antes de transferir carga entre modos, debe analizarse si la nueva cadena de transporte garantiza un buen nivel de servicio.

El nivel de servicio del transporte intermodal tren-carretera depende, entre otros factores, de la eficiencia de las terminales ferroviarias, lugar donde los contenedores cargados de mercancía cambian de modo.

La variedad y la complejidad de sus operaciones, combinado con las restricciones que estas terminales presentan por formar parte de una red de transporte, justifican el gran número de modelos analíticos y de simulación encontrados en la literatura para apoyar distintos problemas de carácter estratégico, táctico y operacional relativos a terminales.

Los modelos de simulación permiten representar la complejidad y la aleatoriedad que una terminal integra y son frecuentemente utilizados para evaluar el comportamiento de terminales concretas ante un plan de trenes, así como para estudiar distintos cambios que ayuden a mejorar su funcionamiento inicial.

La usabilidad de estos modelos depende de su capacidad para representar múltiples sistemas de forma rápida y sencilla, así como del nivel de detalle con el que aparecen representadas las operaciones simuladas.

Los modelos de simulación capaces de representar diversas terminales ferroviarias de contenedores sin necesidad de reprogramar su código inicial son escasos. Los pocos modelos, encontrados en la literatura, que poseen esta cualidad usan una interfaz de usuario para particularizar ciertas características relativas a la demanda y al diseño de los recursos e infraestructuras existentes en la terminal a simular (por ejemplo, número de grúas de un determinado tipo, tiempos de operación para las grúas, etc.), dejando fijos otros aspectos. La flexibilidad de estos modelos para representar cambios sobre el diseño y/o la operación de una terminal es limitada al no poder, por ejemplo, cambiar la función inicial de los nodos simulados (trasferencia de contenedores entre tren-carretera, trasbordo de contenedores entre trenes, etc.), elegir entre distintos tipos de recursos/infraestructuras para realizar una misma tarea o seleccionar reglas alternativas para ejecutar una misma operación, siendo necesario desarrollar modelos aún más flexibles si el objetivo es analizar de forma rápida y sencilla los distintos escenarios de mejora que se pueden derivar de la configuración inicial de una terminal o el funcionamiento de las distintas terminales que componen una red de transporte.

En la literatura, tampoco se han encontrado modelos flexibles de simulación capaces de representar el conjunto de operaciones que puede integrar una terminal ferroviaria de contenedores con suficiente precisión. Esto origina que los resultados que se desprenden de ellos puedan llegar a ser poco fiables para la toma de decisiones.

Por estas razones y en vista de que en ciertas ocasiones el salto entre investigadores y gestores ha podido limitar el uso de la simulación en problemas reales, esta tesis se ha centrado en desarrollar una herramienta de simulación que pueda ser utilizada por usuarios sin conocimientos de programación para generar, de forma fiel a la realidad, rápida y sencilla, modelos de simulación para una amplia variedad de terminales ferroviarias de contenedores a partir de la información introducida por un decisor en una interfaz de usuario. Los modelos generados podrán diferir en términos de diseño y de operación y serán utilizados para evaluar la capacidad que las terminales representadas poseen para satisfacer un plan de trenes. La información proporcionada por esta herramienta será de gran utilidad para los gestores de infraestructuras y de operaciones ferroviarias a la hora de tomar decisiones estratégicas y tácticas relativas, por ejemplo, al diseño de nuevas terminales o al rediseño de terminales existentes para satisfacer nuevas demandas. Además, esta herramienta podrá ser utilizada como paso previo para generar las distintas terminales que componen un modelo de red.

Para el desarrollo de este trabajo, se han estudiado múltiples terminales ferroviarias de contenedores encontradas en la literatura y en distintas webs. Además, se han visitado tres terminales ferroviarias de contenedores de ADIF (empresa pública española encargada de administrar las infraestructuras ferroviarias) y se han mantenido entrevistas con distintos expertos en transporte ferroviario de contenedores que trabajan para ADIF, para RENFE Operadora (principal operador ferroviario español) y para un operador ferroviario alemán.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general de esta tesis es determinar la viabilidad de construir una herramienta de simulación que permita modelar, a partir de la información introducida por un decisor en una interfaz de usuario, un rango de terminales ferroviarias de contenedores mayor que el representado por otras herramientas de simulación encontradas en la literatura y que pueda ser utilizada como herramienta de apoyo para la toma de decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y al rediseño de las terminales representadas.

Este objetivo general se concreta en los siguientes objetivos particulares:

- Estudiar los modelos de simulación propuestos por otros autores para apoyar problemas de planificación estratégica y táctica relativos a terminales, con el propósito de determinar su grado de flexibilidad para representar varios sistemas.
- Explorar las similitudes y las diferencias, en términos de diseño y de operación, presentes en las terminales ferroviarias de contenedores que operan en el mundo.
- Diseñar y desarrollar una herramienta de simulación que sirva de ayuda para la toma de decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y al rediseño de múltiples terminales ferroviarias de contenedores. La herramienta de simulación debe cumplir los siguientes propósitos:
 - Representar fielmente la operación de diversas terminales ferroviarias que intercambian contenedores entre el ferrocarril y al menos otro modo de transporte (carretera, marítimo y/o fluvial). Adicionalmente, estas terminales podrán transferir contenedores entre trenes y/o formar trenes salientes a partir de la clasificación de los vagones transportados por otros trenes entrantes.

- Disponer de una interfaz de usuario para configurar las terminales a simular según sus características de diseño (funciones, infraestructuras, recursos y layout), reglas de operación, horarios de trabajo y demanda.
- Proporcionar indicadores que permitan evaluar el funcionamiento de las terminales representadas.
- Facilitar su modificación y ampliación futura, así como la integración de las terminales generadas en un futuro modelo de red.
- Evaluar escenarios donde varíe la demanda y/o la configuración de las terminales a simular, con el objetivo de comprobar la utilidad del enfoque aplicado para construir esta herramienta, así como el interés de sus resultados.

1.3. ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

Tras este capítulo introductorio, en el capítulo 2, se analiza la evolución del reparto modal del transporte de mercancías en Europa y en España en las últimas décadas y se identifica el uso del transporte ferroviario como alternativa para garantizar un sistema de transporte sostenible a largo plazo. En este contexto, se explica el importante papel que juegan las terminales ferroviarias de contenedores dentro de una cadena de transporte y se justifica su elección como sistema de estudio para esta tesis, destacando la utilidad de desarrollar herramientas de planificación para estudiar y mejorar su funcionamiento y con ello, ayudar a incrementar el atractivo del transporte ferroviario de mercancías.

En el capítulo 3, se presenta la línea de investigación donde se enmarca esta tesis y se plantea el origen del problema de estudio (esto es, determinar la viabilidad de construir una herramienta de simulación capaz de modelar y de estudiar un amplio rango de terminales ferroviarias de contenedores, sin necesidad de reprogramar su código inicial) como resultado de trabajos anteriores. A continuación, se precisa el tipo de terminales a estudiar y se clasifican los aspectos particulares que diferencian unas terminales de otras. Después, se identifican los aspectos que son parametrizables en la herramienta de simulación creada, se exponen las decisiones que esta herramienta permite apoyar y se justifica el uso de la simulación como técnica para su desarrollo. Por último, se describe la metodología de trabajo seguida a lo largo de esta tesis para resolver el problema de estudio planteado previamente.

En el capítulo 4, se revisan los modelos de simulación empleados en la literatura para analizar terminales de transporte intermodal, prestando especial atención a aquellos que presentan un objetivo similar al de esta tesis, esto es, estudiar decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y al rediseño de terminales ferroviarias de contenedores. Esta revisión bibliográfica tiene un doble objetivo. Por un lado, verificar la originalidad y el interés de la herramienta de simulación desarrollada y por otro, recabar información sobre el sistema de estudio. Este segundo objetivo se complementa con los resultados proporcionados por otras fuentes de información: entrevistas con expertos en transporte ferroviario de contenedores, visitas a terminales españolas y fuentes "on-line" que recogen información sobre terminales nacionales e internacionales.

En el capítulo 5, se expone el modelo conceptual de las terminales a representar con la herramienta de simulación desarrollada en esta tesis. Este modelo conceptual captura aquellos aspectos de la realidad, estudiada en el capítulo 4, que son relevantes para abordar el problema de estudio, caracterizado en el capítulo 3.

El capítulo 6 recoge la programación informática de las distintas terminales conceptualizadas en el capítulo 5, así como la puesta en funcionamiento de la herramienta de simulación desarrollada.

En el capítulo 7, se describen: las técnicas empleadas para garantizar que las asunciones realizadas sobre el sistema de estudio, al construir el modelo conceptual, son adecuadas con los objetivos planteados al inicio del estudio de simulación; las técnicas empleadas para verificar que las asunciones de este modelo conceptual han sido trasladadas correctamente a la herramienta de simulación; y las técnicas empleadas para validar que los resultados proporcionados por la herramienta de simulación son coherentes con los proporcionados por el sistema real estudiado.

El capítulo 8 recoge una muestra de los escenarios que pueden ser estudiados con la herramienta de simulación desarrollada.

En el capítulo 9, se recogen las principales conclusiones, aportaciones originales y líneas futuras de trabajo que se desprenden de la realización de esta tesis.

Por último, se presentan las referencias bibliográficas utilizadas (capítulo 10) y dos anexos. El anexo A agrupa un glosario de términos empleados a lo largo del documento, mientras que el anexo B se centra sobre uno de los elementos que

componen la herramienta de simulación desarrollada. Este último anexo recoge la estructura de la interfaz de usuario empleada para configurar las terminales a simular, así como una descripción de las características de diseño y de operación que pueden ser modificadas a partir de ella.

Capítulo 2

TRANSPORTE FERROVIARIO DE MERCANCÍAS EN EUROPA Y ESPAÑA

2.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo describe el contexto en el que se enmarca esta tesis, sirve como punto de partida para acotar su campo de estudio y proporciona información de gran utilidad para entender la caracterización del problema de estudio, que se recoge en el capítulo 3, y el estudio específico de terminales, que se expone en el capítulo 4.

La estructura de este capítulo es la siguiente. En el apartado 2.2, se analiza la evolución por modos del transporte de mercancías en Europa y en España en las últimas décadas y se identifica a la carretera como el modo de transporte predominante. A continuación, se presenta el ferrocarril como alternativa para garantizar un sistema de transporte sostenible a largo plazo y se recoge una lista de medidas propuestas, a nivel europeo y español, para impulsar el transporte ferroviario de mercancías. El éxito de estas medidas depende, entre otros factores, de la cooperación entre agentes del sector ferroviario y de la capacidad de las infraestructuras ferroviarias existentes para satisfacer los nuevos flujos de carga que se pretenden transferir desde la carretera al ferrocarril. Los agentes que intervienen en el sector ferroviario de mercancías se exponen en el apartado 2.3, mientras que, en el apartado 2.4, se describen las principales infraestructuras empleadas para desarrollar este tipo de transporte (terminales y vías) y se justifica la elección de las terminales ferroviarias de contenedores como sistema de estudio para esta tesis. Los detalles relativos a la configuración y a los servicios que prestan las terminales ferroviarias de contenedores se presentan en el apartado 2.5. Por último, el apartado 2.6 recoge las conclusiones de este capítulo.

2.2. SITUACIÓN DEL TRANSPORTE FERROVIARIO DE MERCANCÍAS EN EUROPA Y ESPAÑA

El subapartado 2.2.1 recoge cifras sobre la evolución por modos del transporte de mercancías en Europa y en España entre 1995 y 2008, período para el que existe información completa sobre el conjunto de variables estudiadas en este subapartado.

2.2.1. EVOLUCIÓN POR MODOS DEL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

La prestación de servicios de transporte es una actividad fundamental para la economía europea. En 2008, esta actividad empleó a un 4,5% de la mano de obra europea total y representó alrededor del 4,6% del Valor Añadido Bruto total a precios básicos (Comisión Europea, 2011b).

La Figura 2.1 muestra un importante crecimiento de la demanda de transporte de pasajeros y de mercancías en Europa entre 1995 y 2008. Este crecimiento se debe principalmente a dos factores. En primer lugar, al creciente uso del vehículo doméstico por parte de la población y, en segundo lugar, a la aparición de cambios económicos y productivos que han llevado a incrementar el transporte de mercancías durante las últimas décadas, como, por ejemplo, la deslocalización de ciertas empresas o la evolución de los sistemas de producción basados en almacenaje hacia sistemas de producción ajustada o de flujos (Comisión Europea, 2001).

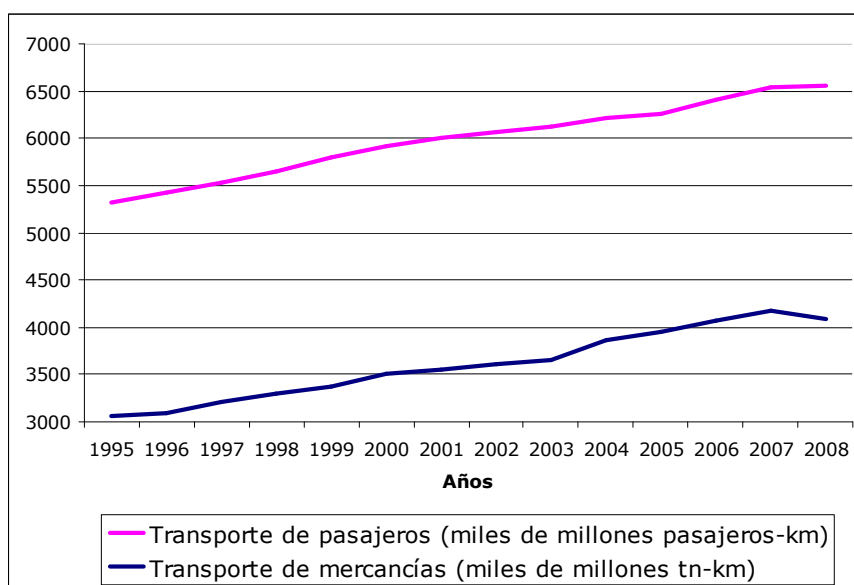


Figura 2.1. Evolución del transporte de pasajeros y de mercancías en la Unión Europea entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).

La evolución por modos del transporte de mercancías en la Unión Europea entre 1995 y 2008 refleja un reparto desigual de los nuevos flujos de carga (véase la Figura 2.2). Todos los modos transportan más carga en 2008 que en 1995, siendo el transporte por carretera y marítimo los más utilizados y los que más han crecido durante este período. Según las cifras publicadas por la Comisión Europea, el 45,9% de las toneladas-kilómetro transportadas en 2008 se movieron por carretera, el 36,6% por transporte marítimo intracomunitario, el 10,8% por ferrocarril, el 3,6% por vías navegables interiores, el 3% por tubería y el 0,1% restante por transporte aéreo intracomunitario (Comisión Europea, 2011b).

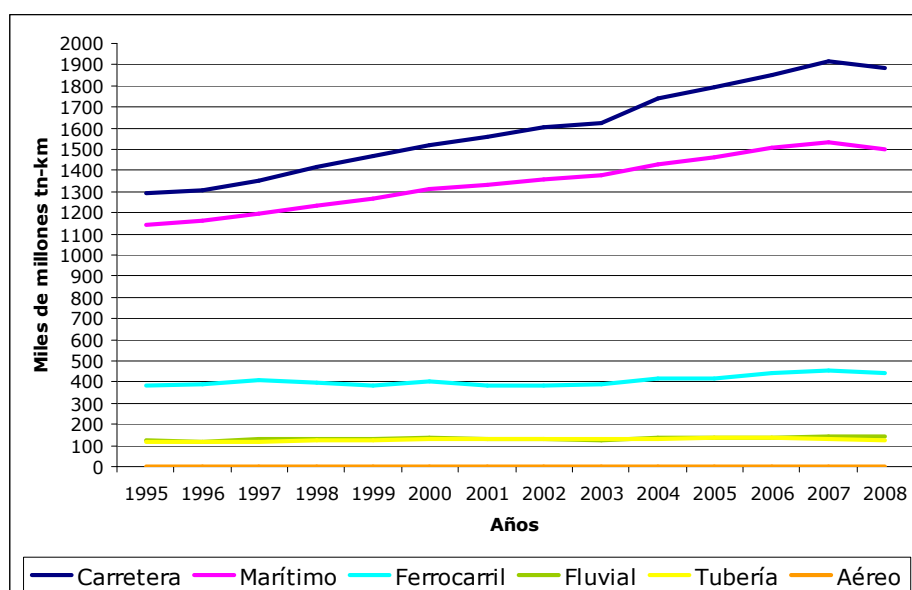


Figura 2.2. Evolución por modos del transporte de mercancías en la Unión Europea entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).

Este reparto modal ha cambiado ligeramente entre 1995 y 2008 (véase la Figura 2.3). Durante este período, el peso del transporte por carretera ha crecido un 3,9%, mientras que el peso del transporte marítimo ha descendido un 0,9%, el peso del transporte por ferrocarril ha descendido un 1,8%, el peso del transporte fluvial ha descendido un 0,5%, el peso del transporte por tubería ha descendido un 0,8% y el peso del transporte aéreo no ha sufrido variaciones significativas.

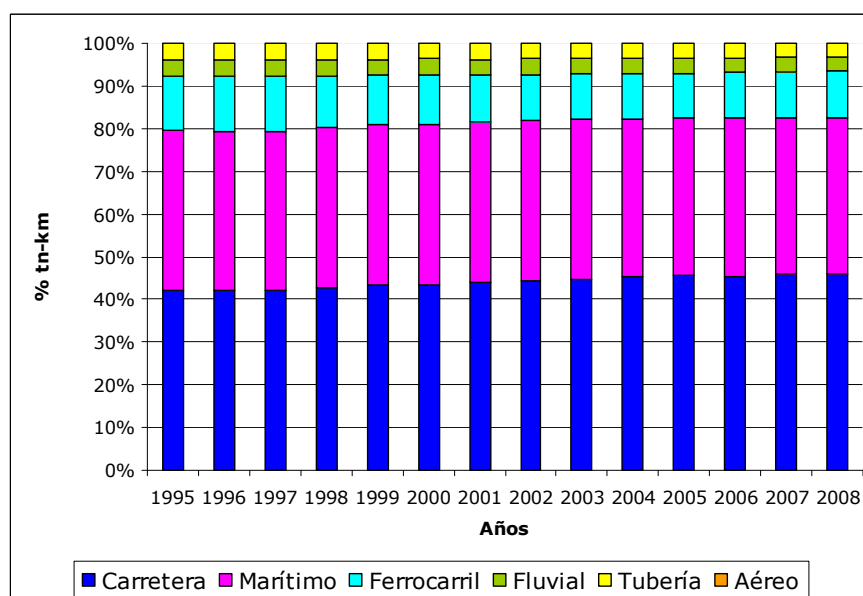


Figura 2.3. Evolución del reparto modal del transporte de mercancías en la Unión Europea entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).

Estos desequilibrios en el reparto modal son aún mayores si se comparan únicamente los modos interiores de transporte (véase la Figura 2.4). En este caso, un 72,6% de las toneladas-kilómetro totales transportadas en 2008 se movieron por carretera (un 5,2% más que en 1995), un 17,1% por ferrocarril (un 3,1%

menos que en 1995), un 5,5% por vías navegables interiores (un 0,9% menos que en 1995) y un 4,8% por tubería (un 1,2% menos que en 1995).

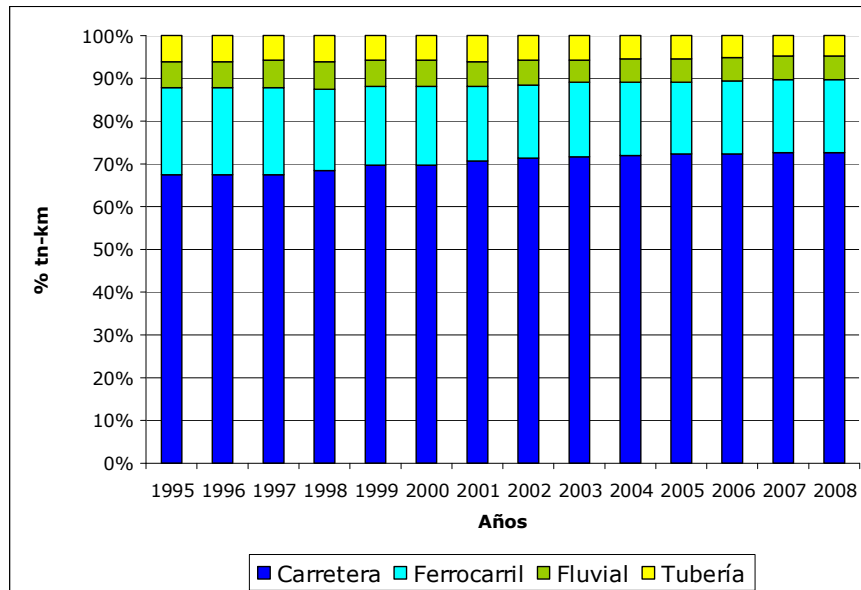


Figura 2.4. Evolución del reparto modal interior del transporte de mercancías en la Unión Europea entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).

Entre 1995 y 2008, la demanda de transporte de mercancías en España también sufrió un importante incremento, pasando de transportar 962.400.000 toneladas en 1995 a 2.104.723.000 toneladas en 2008. Durante este período, todos los modos, salvo el transporte ferroviario, aumentaron su cuota de transporte, siendo el transporte por carretera el que sufrió un crecimiento mayor (véase la Figura 2.5).

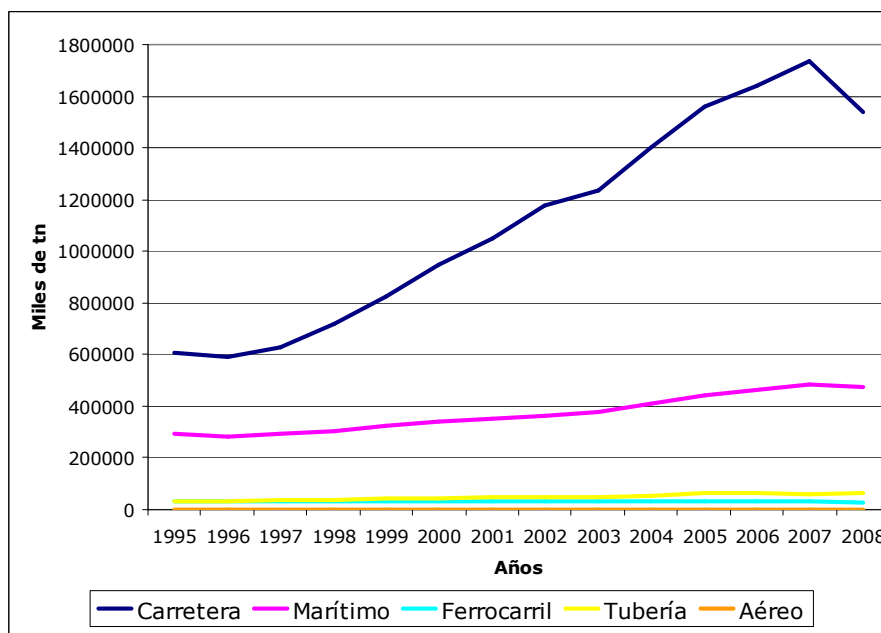


Figura 2.5. Evolución por modos del transporte de mercancías en España entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en INE (2012).

La evolución del reparto modal del transporte de mercancías en España revela un comportamiento similar al expuesto para el marco europeo, esto es, el peso del transporte por carretera ha crecido entre 1995 y 2008 en detrimento de otros modos (véase la Figura 2.6). En 2008, el 73,2% de las toneladas totales transportadas se movieron por carretera (un 9,9% más que en 1995), el 22,5% se movieron por transporte marítimo (un 7,8% menos que en 1995), el 1,3% se movieron por ferrocarril (un 1,8% menos que en 1995), el 3% se movieron por tubería (un 0,3% menos que en 1995) y menos del 0,1% se movieron por transporte aéreo (INE, 2012).

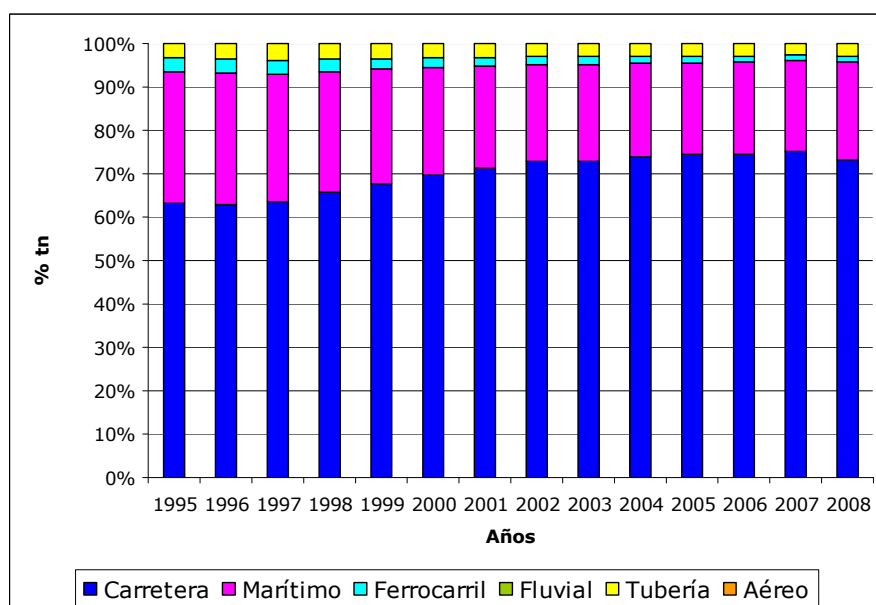


Figura 2.6. Evolución del reparto modal del transporte de mercancías en España entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en INE (2012).

Los desequilibrios en el reparto de mercancías transportadas entre modos interiores son más extremos en España que en Europa. En España, el transporte fluvial no está extendido y el transporte ferroviario tiene mucho menos peso que en otros países de la Unión Europea, haciendo que el transporte por carretera sea el modo preferido para transportar mercancías. Según muestra la Figura 2.7, en 2008, el 92,5% de las toneladas-kilómetro totales transportadas por España se movieron por carretera frente al 72,6% de la Unión Europea, el 4% de las toneladas-kilómetro totales transportadas por España se movieron por ferrocarril frente al 17,1% de la Unión Europea y el 3,5% de las toneladas-kilómetro totales transportadas por España se movieron por oleoducto frente al 4,8% de la Unión Europea (Comisión Europea, 2011b).

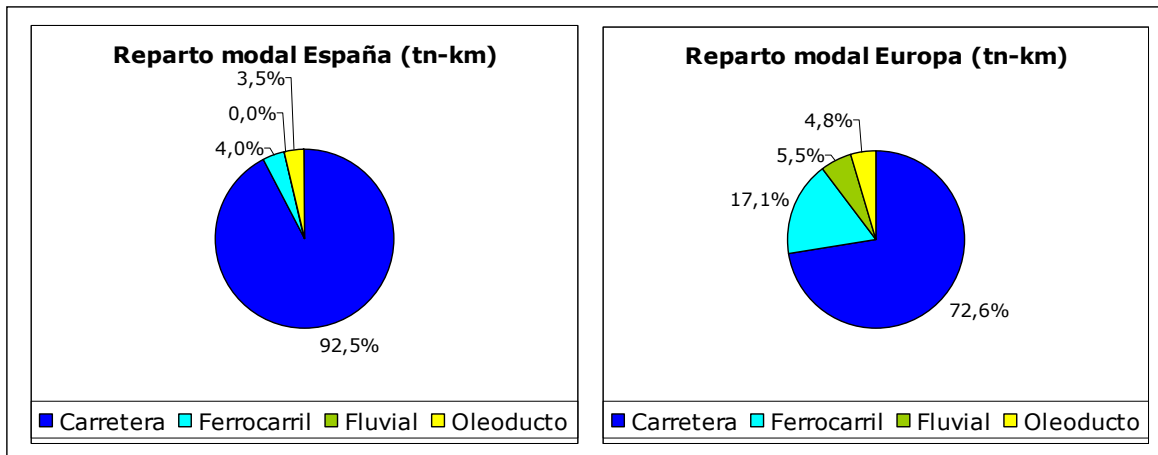


Figura 2.7. Comparativa del reparto modal interior del transporte de mercancías en España y Europa en 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).

Este incremento en el uso del transporte por carretera tanto a nivel europeo como español presenta, entre otros, problemas relativos a:

- **Congestión.** Según estudios publicados en 2001 por la Comisión Europea, cerca de 75.000 kilómetros de carreteras (aproximadamente el 10% de la red europea) sufrían congestión de una manera continuada, representando unos costes externos aproximadamente del 0,5% del Producto Interior Bruto comunitario (Comisión Europea, 2001).
- **Siniestralidad.** En 2008, 38.875 personas murieron en accidentes de tráfico en la Unión Europea frente a las 2.658 personas que murieron en actividades relacionadas con el transporte ferroviario (Eurostat, 2012).
- **Contaminación.** La Figura 2.8 muestra un crecimiento ininterrumpido del consumo final de energía y de las emisiones totales de CO₂ derivadas de las actividades de transporte entre 1995 y 2008. En azul oscuro, se observa que el transporte por carretera es el modo que mayor energía consume.

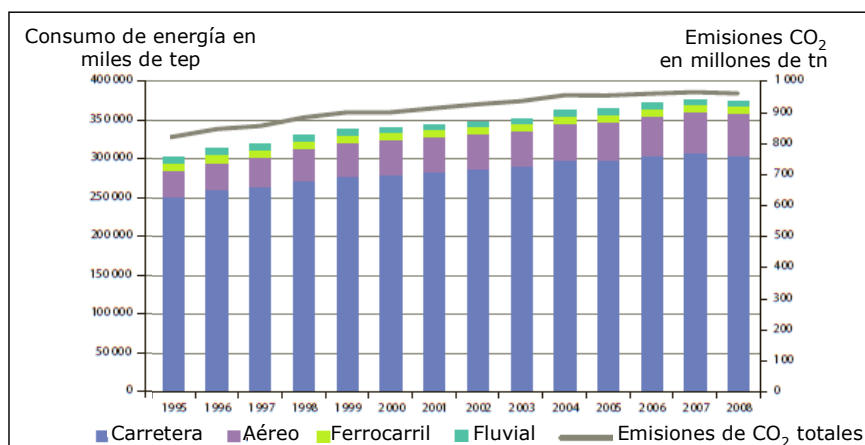


Figura 2.8. Evolución del consumo final de energía por modos de transporte y emisiones totales de CO₂ para el transporte de la Unión Europea entre 1995 y 2008. Fuente: adaptación de Eurostat (2011).

- Ocupación territorial. La Figura 2.9 muestra un descenso del número de kilómetros de vías ferroviarias en uso en la Unión Europea entre 1995 y 2008. Este descenso contrasta con el crecimiento, en número de kilómetros en uso, que sufrieron las autopistas durante este mismo período.

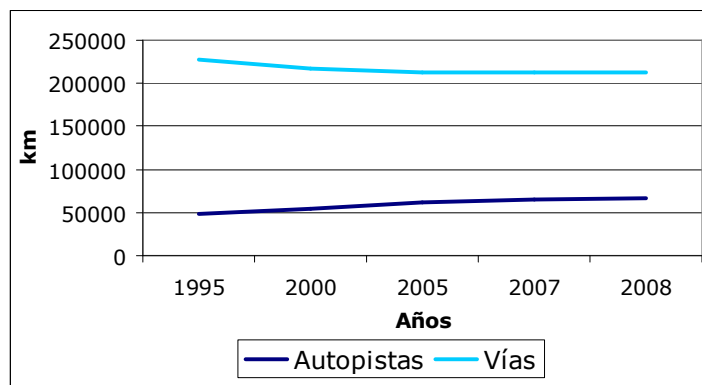


Figura 2.9. Evolución de los kilómetros en uso de vías ferroviarias y de autopistas en la Unión Europea entre 1995 y 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).

En vista de los desequilibrios modales identificados a lo largo de este subapartado y de las externalidades producidas por el transporte por carretera (modo preferido para transportar mercancías en España y en el resto de Europa), la Comisión Europea y sus países miembros se encuentran desde hace más de una década ante el reto de fomentar un uso más racional y equilibrado de los modos de transporte, con el objetivo de garantizar un sistema de transporte sostenible a largo plazo desde un punto de vista económico, social y medioambiental (Comisión Europea, 2001).

2.2.2. TRANSPORTE FERROVIARIO DE MERCANCÍAS COMO ALTERNATIVA AL TRANSPORTE POR CARRETERA

En el contexto identificado anteriormente, el transporte ferroviario, fluvial y marítimo surgen como alternativa frente al transporte exclusivo de mercancías por carretera para garantizar un sistema de transporte sostenible a largo plazo (Comisión Europea, 2001). En el caso del transporte ferroviario, el tren se utiliza para trayectos medios o largos, combinado con la carretera para realizar la etapa inicial y final del transporte.

El transporte intermodal tren-carretera suele utilizar unidades de carga superiores para agrupar y transportar mercancía. Las más utilizadas son la caja móvil y el contenedor. Ambas unidades son reutilizables y están dotadas de ciertos dispositivos que facilitan su trasbordo entre modos (véase la Figura 2.10). La principal diferencia que existe entre ellas radica en sus dimensiones. Las cajas móviles se adaptan a las dimensiones de los vehículos terrestres y han de contar

con la homologación de la Unión Internacional de Ferrocarriles (conocida por las siglas UIC, del francés "Union Internationale des Chemins de Fer") para ser transportadas por ferrocarril. Por el contrario, todos los contenedores terrestres cumplen las especificaciones de la UIC para ser transportados por ferrocarril y por carretera. Otras diferencias entre ambas unidades de carga hacen referencia a que ciertas cajas móviles pueden ser no apilables o ciertos contenedores pueden estar especializados para el transporte de un tipo concreto de mercancías (contenedores cerrados para transportar carga general, contenedores graneleros para transportar cemento o harina, contenedores cisterna para transportar líquidos, etc.) (Ministerio de Fomento, 2012a).

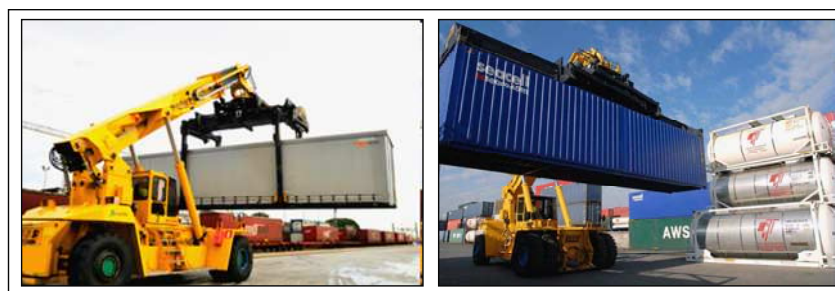


Figura 2.10. Caja móvil (a la izquierda) y contenedor para transportar carga general (a la derecha). Fuente: ADIF (2012c).

El uso combinado del ferrocarril y de la carretera para el transporte de estas unidades de carga permite (Camarero Orive y González Cancelas, 2005; Ministerio de Fomento, 2012a):

- Aumentar la productividad global del sistema de transporte, al aprovechar las ventajas de cada modo.
- Mejorar el aprovechamiento de las infraestructuras y de los equipos de transporte.
- Simplificar el transporte, al eliminar la ruptura de carga, reducir o suprimir los costes de embalaje, reducir tiempos relativos a trámites aduaneros, etc.
- Descongestionar las carreteras y proporcionar mayor fluidez al tráfico.
- Mejorar la seguridad vial, reduciendo el riesgo de accidentes.
- Ahorrar energía y reducir la contaminación.

A pesar de estas ventajas, las conclusiones de ciertos proyectos europeos revelan que el transporte por carretera es más atractivo que el transporte ferroviario en términos de frecuencia, tiempos de tránsito, flexibilidad y costes (IQ, 2000; PROMIT, 2009). Estos factores, claves para la elección de un modo de

transporte, motivan, en parte, que el uso del transporte ferroviario se encuentre muy por debajo del uso del transporte por carretera en número de toneladas-kilómetro transportadas. La Figura 2.11 muestra este desequilibrio entre modos, además de un uso heterogéneo del ferrocarril entre los distintos países de la Unión Europea. En 2008, Alemania, Francia y Polonia fueron los países que más mercancías transportaron por ferrocarril, con más de 40.000 toneladas-kilómetro transportadas. Austria, Italia, Reino Unido y Suecia transportaron entre 20.000 y 40.000 toneladas-kilómetro, mientras que los 20 países restantes transportaron menos de 20.000 toneladas-kilómetro. España se encuentra en el puesto 13 de esta lista, con 10.480 toneladas-kilómetro transportadas.

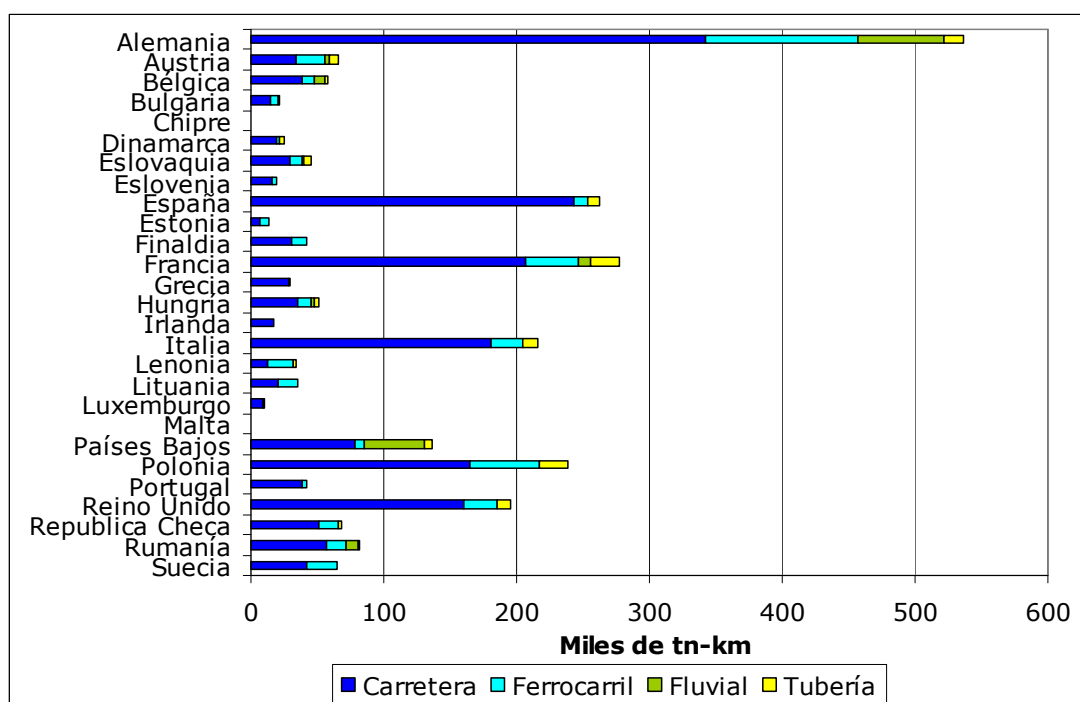


Figura 2.11. Toneladas-kilómetro transportadas por modos interiores y países de la Unión Europea en 2008. Fuente: elaboración propia basada en Comisión Europea (2011b).

Para mejorar el nivel de servicio del transporte ferroviario y conseguir que capte nuevos flujos de carga, es preciso analizar la cadena de transporte desde una perspectiva global con el fin de identificar y solventar los cuellos de botella y otros obstáculos que pueden impedir su desarrollo (Comisión Europea, 1996).

Según Wiegman et al. (1999), Camarero Orive y González Cancelas (2005) y PROMIT (2009), el desarrollo del transporte ferroviario está limitado por las siguientes barreras:

- Barreras organizativas, al existir: demasiados agentes involucrados, falta de cooperación entre agentes, incapacidad de establecer responsabilidades entre agentes al gestionarse y financiarse de forma independiente, etc.

- Barreras técnicas, al no existir: normalización homogénea entre países (en términos de unidades de carga, tratamiento de mercancías peligrosas, etc.), sistemas centralizados de comunicación electrónica entre todos los agentes implicados en la cadena de transporte, etc.
- Barreras relativas a infraestructuras, al existir: deficiencias en las redes de transporte, restricciones de capacidad en los nodos de intercambio modal de carga y en sus vías de acceso, etc.
- Barreras operativas, logísticas y relativas a servicios, al carecer de una cadena de transporte transparente, no disponer de flexibilidad para atender nuevos pedidos en el corto plazo, existir problemas al priorizar el transporte ferroviario de pasajeros frente al transporte de mercancías, etc.
- Barreras financieras y económicas, al existir altos costes relativos a: la compra de nuevos equipos, la construcción de nuevos nodos de intercambio modal, la capacidad de almacenamiento instalada en estos nodos, etc.
- Barreras políticas, al no haber legislaciones homogéneas al inicio y al final de la cadena de transporte, etc.

2.2.3. MEDIDAS PARA IMPULSAR EL TRANSPORTE FERROVIARIO DE MERCANCÍAS

A lo largo de las últimas décadas, la Comisión Europea, los gobiernos de los países miembros de la Unión y distintas organizaciones del sector ferroviario han tomado medidas para reducir las barreras identificadas anteriormente e impulsar el transporte ferroviario de mercancías.

Entre las principales acciones llevadas a cabo por la Comisión Europea, se encuentran:

- Los paquetes ferroviarios. La Comisión Europea ha aprobado tres paquetes con directivas para revitalizar el sector ferroviario y así, solucionar parte de los problemas de movilidad en la Unión Europea. El primer paquete se aprobó en 2001 y tenía por objetivo la apertura del mercado ferroviario y el establecimiento de un sistema basado en libre competencia. El segundo paquete, presentado en 2002, estaba relacionado con la construcción de un espacio ferroviario europeo integrado. Por último, el tercer paquete, adoptado en 2004, incluía medidas para revitalizar los ferrocarriles europeos (Comisión Europea, 2007a).

- La creación de la Agencia Ferroviaria Europea. Según lo indicado en el subapartado 2.2.2, la existencia de normas técnicas y de seguridad diferentes entre países de la Unión Europea supone un gran obstáculo para el desarrollo del transporte ferroviario. La Agencia Ferroviaria Europea fue creada en 2004 para aproximar progresivamente esas normas técnicas y fijar métodos y objetivos de seguridad comunes para el sistema ferroviario europeo (Comisión Europea, 2010).
- Los Libros Blancos. La Comisión Europea ha publicado tres Libros Blancos que recogen la estrategia a seguir por la Unión Europea en materia de transporte. El primero fue publicado en 1992, el segundo en 2001 y el tercero en 2011. Éste último tiene por objetivo alcanzar, en 2050, un espacio europeo único de transporte y una movilidad competitiva y sostenible (Comisión Europea, 2011c). Para ello, establece diversos objetivos orientados a incrementar el uso del transporte ferroviario de mercancías: intentar transferir, desde 2011 a 2030, un 30% de la carga transportada por carretera a otros modos, como el ferrocarril o las vías navegables interiores, y, para 2050, conseguir una transferencia superior al 50%, apoyándose en corredores eficientes y ecológicos; garantizar que los principales puertos marítimos estén bien conectados con el sistema ferroviario de transporte de mercancías y, cuando sea posible, con el sistema de navegación interior; etc. Como en anteriores documentos, la consecución de estos objetivos contará con un plan de acción, compuesto por un conjunto de medidas escalonadas, y un informe intermedio para comprobar que los objetivos planteados se van cumpliendo.
- La apuesta por la red transeuropea de transporte. Desde sus orígenes, la red transeuropea de transporte ha sido un elemento clave para el buen funcionamiento del mercado único, pues une las regiones europeas y las redes nacionales desde un punto de vista tecnológico y jurídico. Tras su última revisión, esta red se divide en dos subredes: una red global y otra básica. La red global garantiza el acceso a todas las regiones de la Unión Europea con unos estándares mínimos comunes, mientras que la red básica, que forma parte de la global, constituye una malla conexa que une los nodos y enlaces de importancia estratégica (terminales ferroviarias, aeropuertos, etc.) a través de corredores multimodales. Entre las prioridades de la Comisión Europea para 2030, está disponer de una red básica multimodal y plenamente operativa que cubra toda la Unión Europea (Comisión Europea, 2011c).

- Programas de ayudas de la Comisión Europea, como el programa PACT, el programa Marco Polo y el programa Marco Polo II (Comisión Europea, 2002; Comisión Europea, 2007b; Comisión Europea, 2011d). El programa PACT (1997-2001) financiaba acciones encaminadas a potenciar el uso combinado del ferrocarril, de las vías navegables o del transporte marítimo a corta distancia con la carretera. El programa Marco Polo (2003-2006) también financiaba acciones orientadas a trasladar parte de los flujos transportados por carretera a otros modos, aunque, en este caso, no sólo con el objetivo de incentivar el transporte intermodal (esto es, el movimiento de mercancías agrupadas en una misma unidad de carga o vehículo a través de dos o más modos de transporte, Ministerio de Fomento, 2012a) o el transporte combinado (concepto empleado por la Comisión Europea para identificar al transporte intermodal de mercancías, entre estados miembros de la Unión Europea, donde se usa el tren, las vías navegables o las travesías marítimas para los recorridos principales y la carretera para recorridos mínimos, Ministerio de Fomento, 2012a), sino con el fin de reducir la congestión de las carreteras y los efectos negativos del transporte sobre el medioambiente. El programa Marco Polo II (2007-2013) posee el mismo objetivo que el programa Marco Polo inicial, además de incluir nuevas acciones y una cobertura geográfica más amplia para la concesión de proyectos.
- La oferta de proyectos europeos de investigación y de desarrollo en materia de transporte. Éste puede ser el caso, por ejemplo, del proyecto IQ (mejorando la calidad del transporte intermodal), IRIS (innovación en sistemas de transporte intermodal) o PROMIT (promoviendo un transporte ferroviario innovador) (Comisión Europea, 2012).
- La creación del grupo de interés AGORA (AGORA, 2012). En 2007, surgió un grupo de trabajo "ad hoc" para el estudio de terminales de transporte intermodal que, impulsado por el proyecto Marco Polo II de aprendizaje común 2009-2010, ha pasado a ser un grupo permanente de colaboración. El objetivo de este grupo es poner en contacto a múltiples gestores de terminales para que intercambien información, ideas y buenas prácticas en la gestión de estos nodos. Sus resultados están orientados a mejorar el aprovechamiento de las actuales terminales de intercambio modal, contribuir a la normalización de sus procedimientos, reducir costes, mejorar la interacción con otros agentes de transporte intermodal, etc. Todo ello con el objetivo de optimizar la cadena de transporte e incentivar el transporte intermodal en Europa.

En la misma línea que la Comisión Europea, el gobierno español también ha desarrollado varias acciones para impulsar el transporte ferroviario de mercancías. Entre ellas, se encuentra:

- El desarrollo del Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT). El Ministerio de Fomento elaboró este plan en 2005, con el objetivo de abordar los retos a los que ha de hacer frente el sistema de transporte español entre 2005 y 2020 y proponer medidas que puedan contribuir a mejorar la competitividad económica, la cohesión territorial y social y la seguridad y calidad de servicio en todos los modos de transporte (Ministerio de Fomento, 2012b). Las prioridades en materia ferroviaria han sido divididas en tres períodos: 2005-2008, 2009-2013 y 2013-2020. Entre las acciones para incentivar el uso del transporte ferroviario de mercancías entre 2005 y 2008, se encuentra: mejorar la red convencional y preparar su transformación progresiva a ancho internacional o ancho UIC; crear un programa de apoyo para incentivar el transporte intermodal, dando particular atención a los servicios internacionales; optimizar las instalaciones fronterizas de mercancías; etc. A partir de 2009, las actuaciones irían encaminadas a alcanzar la interoperatividad plena en el paso de la frontera francesa y a consolidar el papel internacional de los operadores ferroviarios que transportan mercancías. Las actuaciones a partir de 2013 se precisarán en función de los resultados obtenidos en los períodos anteriores. Según la participación del transporte ferroviario entre 2005 y 2013, podría iniciarse, por ejemplo, la ejecución de un nuevo corredor transpirenaico o el desarrollo de nuevos ejes transversales en el mallado de la red.
- La apuesta por una nueva red transeuropea española. En octubre de 2011, la Comisión Europea aprobó la incorporación de cinco corredores españoles (Atlántico, Cantábrico-Mediterráneo, Atlántico-Mediterráneo, Mediterráneo y Central) a la red transeuropea de transporte (véanse en la Figura 2.12). En materia ferroviaria, la red existente y las nuevas líneas planificadas formarán parte de la red global. La red básica de mercancías incorporará las conexiones a puertos y potenciará los ejes transfronterizos. Se prevé que el desarrollo de esta última red requiera de fuertes inversiones entre 2014 y 2020 (Ministerio de Fomento, 2012d).

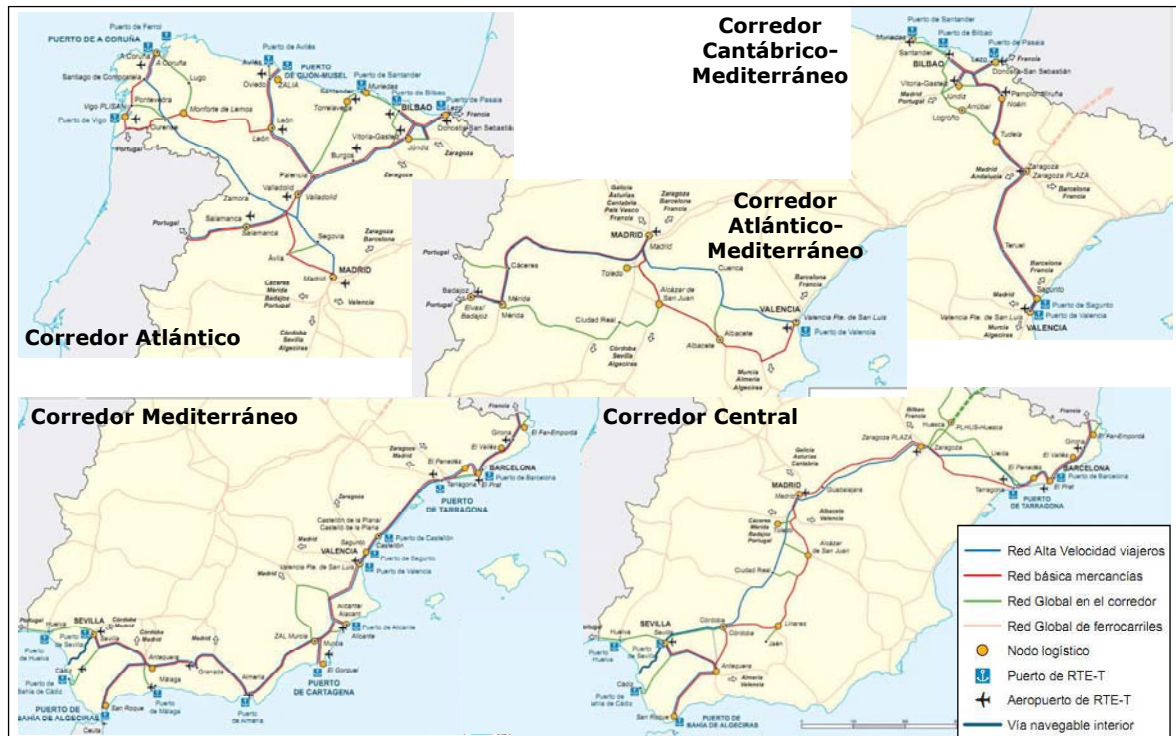


Figura 2.12. Corredores españoles de la red ferroviaria transeuropea de mercancías. Fuente: elaboración propia basada en Ministerio de Fomento (2012c).

Del mismo modo, otras organizaciones se han encargado de promover el transporte ferroviario de mercancías a nivel mundial. Por ejemplo, las empresas ferroviarias miembros de la Unión Internacional de Ferrocarriles y los operadores ferroviarios miembros de la Unión Internacional de Transporte Combinado Ferrocarril-Carretera (conocida por las siglas UIRR, del inglés "International Union of combined Road-Rail transport companies") firmaron en 2005 un compromiso conjunto para incrementar la calidad de servicio de los trenes regulares de transporte intermodal y de los contratos que cubren esta calidad. Del mismo modo, los miembros de la Comunidad de Empresas Ferroviarias y de Infraestructura Europeas (conocida por las siglas CER) trabajan diariamente para proponer medidas que mejoren el transporte ferroviario de mercancías (ADIF, 2008).

Las medidas propuestas a lo largo de este apartado favorecen el impulso del transporte ferroviario de mercancías. Sin embargo, este impulso depende, entre otros factores, de la coordinación entre agentes del sector ferroviario y de la capacidad de las infraestructuras ferroviarias existentes para absorber los nuevos flujos de mercancía que se pretenden transferir desde la carretera al ferrocarril (PROMIT, 2009). En los apartados 2.3 y 2.4, se describen, respectivamente, los agentes y las infraestructuras que intervienen en el transporte ferroviario de mercancías.

2.3. AGENTES DEL SECTOR FERROVIARIO

El número de agentes que componen el sector ferroviario de los países miembros de la Unión Europea se ha visto incrementado en las últimas décadas con la aprobación de las directivas europeas 91/440/CEE, 95/18/CE y 95/19/CE, donde, entre otros aspectos, se establece separar la responsabilidad del estado en materia ferroviaria de la que poseen las empresas ferroviarias, desligar la administración de las infraestructuras ferroviarias de la explotación de sus servicios de transporte y permitir la entrada de nuevos operadores ferroviarios privados en el mercado (Comisión Europea, 2011a).

Los principales agentes que intervienen en el sector ferroviario de mercancías pueden clasificarse en cuatro grandes grupos: estado, empresas administradoras de infraestructuras, operadores ferroviarios y otros órganos relacionados con el transporte ferroviario. En el caso español (BOE, 2003; ADIF, 2012a; Puertos del Estado, 2012):

- El Ministerio de Fomento se encarga de administrar el sector ferroviario en su conjunto. Entre sus principales competencias están: la planificación estratégica de las infraestructuras y de la oferta de servicios ferroviarios, la ordenación y la regulación del sistema ferroviario, y la definición de objetivos y la supervisión de la actividad de ADIF y RENFE Operadora, así como de su sistema de financiación. ADIF y RENFE Operadora fueron creadas tras la aprobación de la Ley del Sector Ferroviario 39/2003, destinada, por un lado, a separar la administración de la infraestructura de la explotación de los servicios de transporte ferroviario y, por otro lado, a sentar las bases para permitir la entrada progresiva de nuevos operadores en el mercado.
- ADIF (Administrador de Infraestructuras Ferroviarias) es un organismo público adscrito al Ministerio de Fomento que comenzó a operar en 2005, con el objetivo de construir nuevas infraestructuras ferroviarias y de administrar y explotar las infraestructuras que estén bajo su titularidad o se le asignen por convenio. Estos convenios permiten, por ejemplo, que ADIF participe en la explotación de terminales ferroviarias interiores privadas o en la explotación de terminales ferroviarias integradas en puertos que son responsabilidad de Puertos del Estado y Autoridades Portuarias (organismos públicos también adscritos al Ministerio de Fomento). En su creación, ADIF heredó las funciones de la extinta empresa pública GIF (Gestor de

Infraestructuras Ferroviarias) y las infraestructuras de la también extinta empresa pública Red Nacional de Ferrocarriles Españoles (RENFE).

- RENFE Operadora comenzó a operar como entidad pública empresarial prestadora de todo tipo de servicios de transporte ferroviario en 2005. En la actualidad, los servicios relativos a mercancías que comercializa se dividen, según el tipo de producto a transportar, en cuatro sociedades mercantiles: Contren, Irion, Multi y Pecovasa. Estas cuatro sociedades mercantiles, cuya participación está abierta al mercado hasta un máximo del 45%, cuentan con autonomía de gestión y estructuras diferenciadas para desarrollar la comercialización de sus servicios (Vía Libre, 2011; RENFE Operadora, 2012a).
- A partir del 1 de enero de 2005, también quedó abierta la entrada de nuevos operadores ferroviarios privados en el mercado. A fecha de 31 de diciembre de 2011, el Ministerio de Fomento había otorgado licencia para el transporte ferroviario de mercancías a las siguientes empresas: RENFE Operadora, COMSA RAIL TRANSPORT S.A., CONTINENTAL RAIL S.A., ACCIONA RAIL SERVICES S.A., ACTIVA RAIL S.A., TRACTION RAIL S.A., EUSKO TRENBIDEAK Ferrocarriles Vascos S.A., ARCELORMITAL SIDERAIL S.A., LOGITREN FERROVIARIA S.A.U., FESUR Ferrocarriles del Suroeste S.A., FGC Mobilitat S.A., ALSA Ferrocarril S.A.U., GUINOVART RAIL S.A.U., FERROVIAL RAILWAY S.A. y LOGIBERICA RAIL S.A.U. Si estos operadores ferroviarios no realizan envíos puerta a puerta, tendrán que estar en contacto con otros operadores logísticos para cerrar la cadena de transporte que conecta al cargador (persona que toma la decisión de realizar un envío de mercancía) con el destinatario (persona que recibe el envío).
- El incremento del número de agentes que componen el mercado ferroviario hizo necesaria la creación del Comité de Regulación Ferroviaria, encargado de resolver los conflictos que puedan surgir entre agentes y de garantizar un correcto funcionamiento de este sistema.
- Además, existen otros órganos colegiados relacionados con el transporte ferroviario, como son: la Comisión asesora de seguridad en la circulación ferroviaria, la Comisión de investigación de accidentes ferroviarios y el Comité para la coordinación del transporte de mercancías peligrosas.

2.4. INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS PARA EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS

Las redes ferroviarias empleadas para el transporte de mercancías están compuestas por las infraestructuras nodales o terminales, las vías que conectan dichas terminales entre sí y los sistemas de seguridad y de control que regulan el tráfico de los trenes por las vías.

En los subapartados siguientes, se proporcionan detalles sobre las infraestructuras relevantes para el desarrollo de esta tesis (terminales y vías) y se justifica la elección de las terminales ferroviarias de contenedores como sistema de estudio.

2.4.1. TERMINALES FERROVIARIAS

Las terminales han sido elegidas como sistema de estudio para esta tesis por dos motivos. En primer lugar, por la variedad y la complejidad de operaciones que integran y por las restricciones que presentan al formar parte de una red de transporte. En segundo lugar, por el papel crítico que juegan dentro de la cadena de transporte, al ser el lugar donde la mercancía cambia de modo. Este cambio de modo puede incrementar el tiempo y el coste del envío frente al uso de un transporte exclusivo por carretera. Es por esto que el estudio de terminales se haya convertido en un aspecto clave para mejorar su funcionamiento y así, aumentar el atractivo del transporte ferroviario de mercancías (Vasilis Vasiliasuskas y Kabashkin, 2006).

El criterio más significativo para clasificar las terminales que componen una red de transporte ferroviario es probablemente el número de modos entre los que se intercambia mercancía. De acuerdo con este criterio, las terminales pueden dividirse en tres categorías: terminales ferroviarias interiores, terminales portuarias y terminales fluviales. En las terminales ferroviarias interiores, suele intercambiarse mercancía entre el ferrocarril y la carretera. En los otros dos tipos, hay potencialmente tres modos de transporte involucrados. En una terminal portuaria, podría intercambiarse carga entre transporte marítimo, ferroviario y por carretera, mientras que, en una terminal fluvial, la carga podría intercambiarse entre transporte por vías navegables interiores, por ferrocarril y por carretera.

El alcance de esta tesis ha quedado limitado a terminales ferroviarias interiores y terminales ferroviarias integradas en terminales portuarias o fluviales. Esta elección viene motivada por tres razones. En primer lugar, las terminales ferroviarias interiores suelen ser los nodos más numerosos dentro de una red de

transporte ferroviario. En segundo lugar, en una terminal portuaria, existen grandes diferencias entre el subsistema asociado con la entrada/salida de mercancía por ferrocarril y el subsistema relacionado con la entrada/salida de mercancía por barco. Ambos subsistemas emplean equipos diferentes para manipular mercancía y realizan de forma diferente procesos similares. Por ejemplo, existen grandes diferencias entre los equipos empleados para cargar/descargar barcos y trenes, así como entre ambos procesos. Además, el subsistema marítimo suele ser más grande, en términos de volumen de mercancías manipuladas, y automatizado que el subsistema ferroviario. En tercer y último lugar, el subsistema fluvial ha quedado fuera del ámbito de estudio de esta tesis, porque este modo de transporte sólo es importante en países donde existe un gran número de vías navegables interiores, como Alemania, Bélgica, Bulgaria, Países Bajos o Rumania, mientras que, en otros países, como España, Portugal o Polonia, no está extendido (véase la Figura 2.13). Además, el subsistema fluvial y el subsistema marítimo de una terminal portuaria suelen presentar más similitudes entre sí que con el subsistema ferroviario presente en ambos tipos de terminales trimodales.

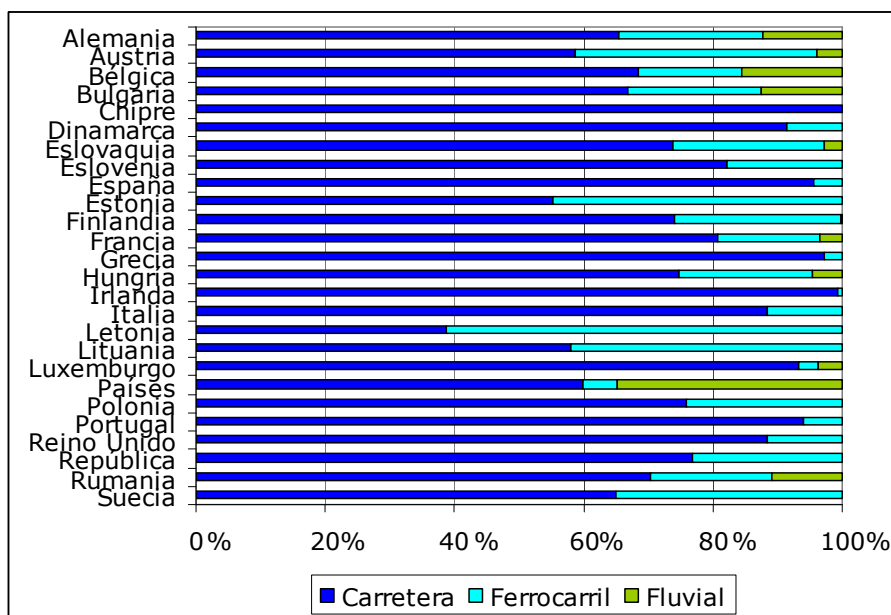


Figura 2.13. Reparto modal interior del transporte de mercancías por países de la Unión Europea en 2008. Fuente: elaboración propia basada en Eurostat (2012).

Las terminales ferroviarias pueden clasificarse, a su vez, según su carácter público o privado o según el tipo de mercancías que manejan.

RENFE Operadora, principal operador de la red ferroviaria española, identifica, en su página web (RENFE Operadora, 2012a), cinco familias de productos a transportar y, por tanto, cinco familias de productos a manipular en las terminales ferroviarias españolas:

- Graneles, que engloba graneles sólidos (carbón, cementos, cereales, áridos, abonos, etc.) y prefabricados de hormigón (vigas, traviesas, dovelas, etc.).
- Multiproducto, que abarca madera, papel, productos químicos, productos manufacturados y productos especiales por sus dimensiones o pesos.
- Siderúrgicos, que contiene materias primas (chatarras, etc.), productos planos (bobinas de acero, etc.), productos largos (perfiles, chapa, etc.), tuberías (tubos de canalización, etc.), etc.
- Automóvil, que comprende piezas, componentes y productos terminados del sector del automóvil.
- Intermodal, que incluye cajas móviles y contenedores de diferentes tamaños, por ejemplo, de 20, 30, 40 y 45 pies.

La Figura 2.14 muestra el número de toneladas transportadas por RENFE Operadora para cada familia de productos a lo largo de los años 2009 y 2010. Los resultados presentados revelan que intermodal es la familia predominante, seguida de graneles y siderúrgicos.

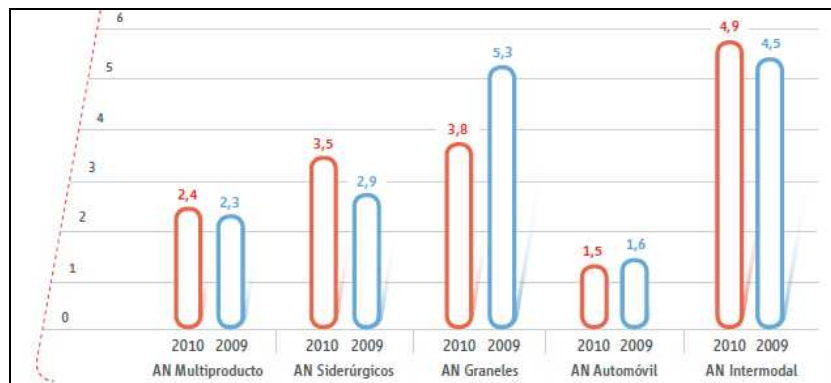


Figura 2.14. Millones de toneladas transportadas por RENFE Operadora en 2009 y 2010 para cada familia de productos. Fuente: adaptación de RENFE Operadora (2011).

Analizando el número de toneladas-kilómetro brutas y netas transportadas por RENFE Operadora en el año 2010 (véase la Figura 2.15), destaca también el peso del transporte intermodal, seguido del transporte de siderúrgicos y de multiproducto.



Figura 2.15. Millones de toneladas-kilómetro brutas y netas transportadas por RENFE Operadora en 2010 para cada familia de productos. Fuente: adaptación de RENFE Operadora (2011).

Además de las diferencias encontradas en relación al volumen de carga transportada, existen diferencias relativas al tipo de trenes ofertados por RENFE Operadora para cada familia de productos. Intermodal posee un servicio de transporte regular que conecta múltiples terminales con una frecuencia semanal fija. En este caso, múltiples usuarios pueden elegir qué tren multicliente encaja mejor para transportar su mercancía y reservar uno o varios huecos dentro de él. Intermodal también posee un servicio de trenes completos o trenes cliente. Estos trenes son contratados por un único cliente para transportar grandes volúmenes de mercancía desde un origen a un destino concreto. Multiproducto, siderúrgicos, graneles y automóvil poseen únicamente trenes cliente (RENFE Operadora, 2012a).

En esta tesis, se ha considerado el transporte intermodal de contenedores (o cajas móviles) como sistema de estudio, al ser la familia de productos más extendida entre las terminales ferroviarias españolas y con más volumen de mercancías transportadas. El subapartado 2.5 recoge más detalles sobre la configuración y los servicios que presentan estas terminales.

2.4.2. VÍAS

Las vías conectan las terminales ferroviarias entre sí y, en ciertos casos, influyen en su operación.

En la red de transporte ferroviario española y europea, existen vías dedicadas al transporte de pasajeros, al transporte de mercancías o a un tráfico mixto de pasajeros y mercancías. Si se da este último caso, los pasajeros suelen tener prioridad frente al transporte de mercancías (PROMIT, 2009). De tal forma que, en caso de aparecer interferencias durante la circulación, los trenes de mercancías deben apartarse de la vía principal para ceder su paso a los trenes de pasajeros. Para reducir estas interferencias, es frecuente que el transporte de mercancías quede limitado a franjas horarias donde el flujo de pasajeros es bajo. Esta medida impide equilibrar la carga de trabajo de las terminales, al concentrar, generalmente, un gran flujo de trenes entrantes a primera hora de la mañana y un gran flujo de trenes salientes a última hora de la tarde o durante la noche.

Otro aspecto que diferencia unas vías de otras es su ancho. Según muestra la Figura 2.16, el ancho de vía en Europa no es homogéneo. Por ejemplo, en Francia, se utiliza el ancho internacional, mientras que, en España, existen, principalmente, dos anchos de vía diferentes: el ancho ibérico (que cubre la red convencional por donde circulan los trenes de mercancías) y el ancho internacional (usado principalmente en la red de alta velocidad) (ADIF, 2012a). En el caso

español, estas diferencias complican la entrada/salida de trenes a través de la frontera francoespañola, al tener que trasbordar la mercancía a otro tren con ancho ibérico, si su destino es la península ibérica, o con ancho internacional, si su destino está fuera de la península ibérica.

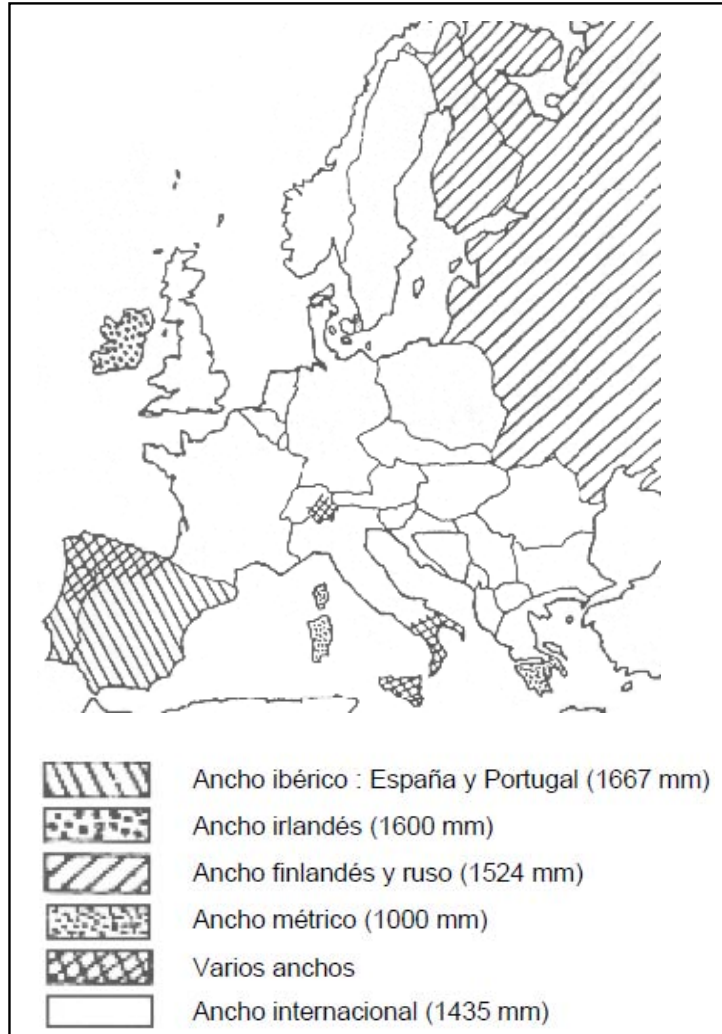


Figura 2.16. Mapa de anchos de vía en Europa. Fuente: Ministerio de Fomento (2012a).

Del mismo modo, los tramos de una red de transporte ferroviario pueden diferir según el número de vías que posee. En este caso, pueden existir tramos con doble vía (una vía para cada sentido) o tramos con vía única (donde un tren debe apartarse si otro viene en el sentido contrario (ADIF, 2012a). La Figura 2.17 muestra que los principales corredores españoles (corredor del Mediterráneo y corredor Central) poseen doble vía, mientras que otros tramos (como los existentes en Extremadura) poseen vía única. La Figura 2.17 también indica qué vías están electrificadas y cuáles no. Este aspecto condiciona el tipo de locomotora (eléctrica o de combustible) que debe ser utilizada para mover un tren entre dos puntos de la red ferroviaria española.

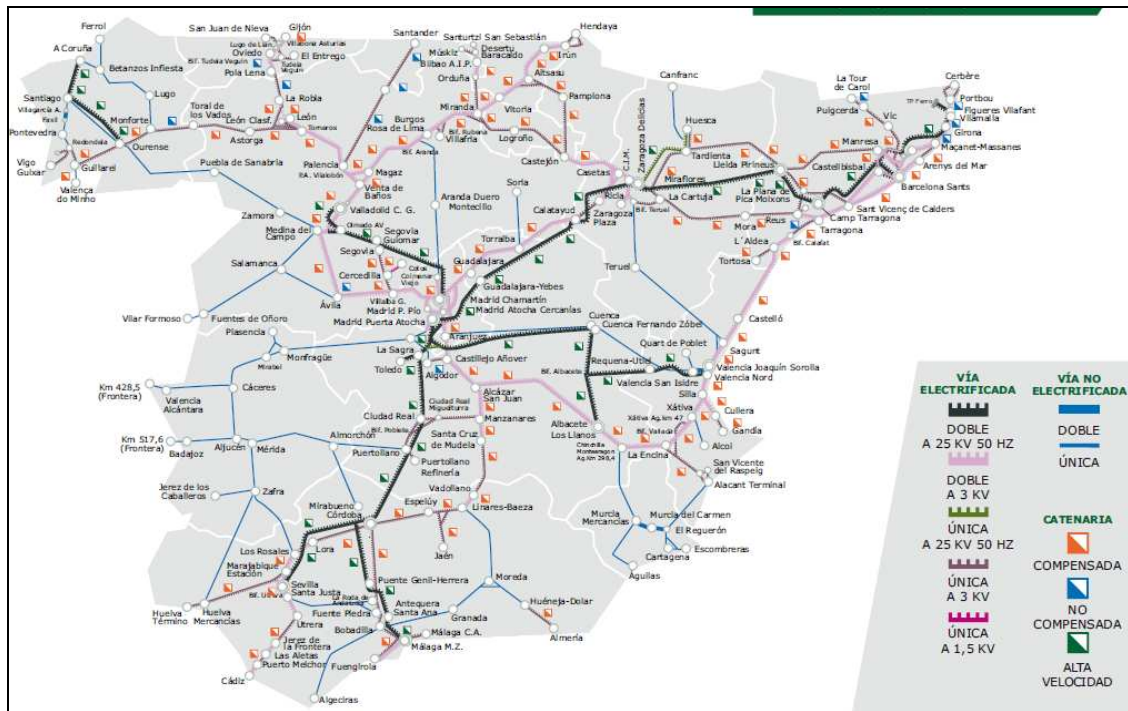


Figura 2.17. Mapa de vías dobles/únicas y electrificadas/no electrificadas en España. Fuente: ADIF (2012a).

2.5. CONFIGURACIÓN Y SERVICIOS DE LAS TERMINALES FERROVIARIAS DE CONTENEDORES

En este apartado, se describe, de forma general, el sistema considerado como objeto de estudio en esta tesis. El subapartado 2.5.1 analiza las instalaciones que componen una terminal ferroviaria de contenedores, junto a los principales servicios que prestan. Las infraestructuras y los recursos necesarios para proporcionar estos servicios se describen en el subapartado 2.5.2.

Esta información sirve como punto de partida para entender la caracterización del problema de estudio, que se recoge en el capítulo 3, y el estudio específico de terminales, que se expone en el capítulo 4.

2.5.1. INSTALACIONES Y SERVICIOS DE LAS TERMINALES FERROVIARIAS DE CONTENEDORES

Las terminales ferroviarias de contenedores se encargan, principalmente, de intercambiar contenedores (o cajas móviles) entre el ferrocarril y, al menos, otro modo de transporte (carretera, marítimo o fluvial). Adicionalmente, estas terminales pueden trasbordar unidades de carga entre trenes, segregar/agregar vagones o plataformas de/a un tren entrante para formar un nuevo tren saliente, consolidar las plataformas transportadas por varios trenes entrantes en un único tren saliente, desconsolidar las plataformas transportadas por un tren entrante para

formar varios trenes salientes y/o clasificar las plataformas transportadas por varios trenes entrantes para formar varios trenes salientes (Notteboom, 2008; Woxenius y Bärthel, 2008; Marinov et al., 2013).

Las instalaciones encargadas de realizar estas tareas pueden dividirse en dos bloques: instalaciones técnicas e instalaciones logísticas (ADIF, 2012a). Las instalaciones técnicas se ocupan de proporcionar: servicios de formación/descomposición de trenes a partir de la agregación, segregación, consolidación, desconsolidación y clasificación de sus plataformas, servicios de entrada de trenes a la terminal, servicios de salida de trenes hacia la red y servicios complementarios a la entrada y a la salida de trenes (retirada/colocación de locomotora, estacionamiento, etc.). Las instalaciones logísticas se encargan de intercambiar unidades de carga entre modos, de su almacenaje y/o del trasbordo de unidades de carga entre trenes.

Entre otros aspectos, las instalaciones logísticas pueden diferir de unas terminales a otras según el sistema empleado para transportar contenedores (o cajas móviles) sobre trenes. Según Lowe (2005) y el Ministerio de Fomento español (2012a), existen cuatro sistemas posibles (véase la Figura 2.18). El primero consiste en transportar contenedores directamente sobre las plataformas que forman el tren, el segundo en transportar semirremolques cargados con contenedores sobre las plataformas que forman el tren, el tercero en transportar camiones completos sobre las plataformas que forman el tren y el último en transportar contenedores cargados sobre plataformas bimodales, esto es, plataformas provistas de un bogie desmontable o de un solo eje que pueden ser utilizadas como semirremolque de un camión o como plataforma de un tren.

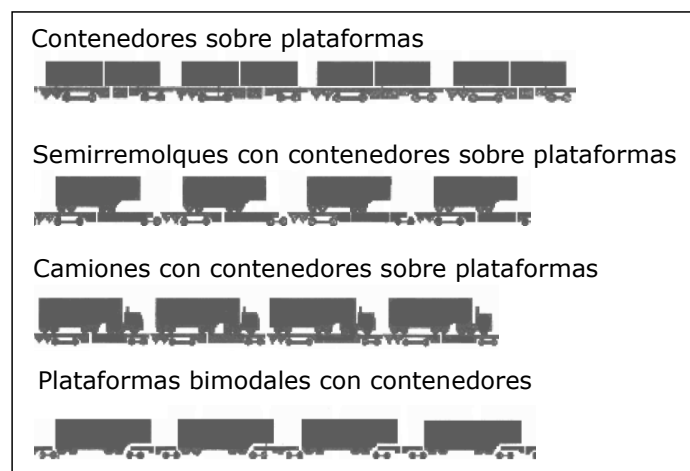


Figura 2.18. Sistemas empleados para transportar contenedores sobre trenes. Fuente: adaptación de Ministerio de Fomento (2012a).

Además de los servicios indicados a lo largo de este apartado, las terminales ferroviarias de contenedores pueden prestar otros de menor importancia para esta tesis, como, por ejemplo, el suministro de corriente de tracción o la facturación de las operaciones realizadas sobre las plataformas y sobre los contenedores (o cajas móviles) transportados por un tren.

2.5.2. INFRAESTRUCTURAS Y RECURSOS DE LAS TERMINALES FERROVIARIAS DE CONTENEDORES

El uso de contenedores (o cajas móviles) para agrupar y transportar mercancía, junto a otros factores, como el sistema empleado para transportar contenedores sobre trenes, el volumen de carga manipulada o el espacio disponible, condicionan las infraestructuras y los recursos existentes en una terminal ferroviaria de contenedores.

Una terminal ferroviaria de contenedores puede disponer de las siguientes infraestructuras (León, 1999; Camarero Orive y González Cancelas, 2005):

- Uno o varios haces de vías dedicados a una o varias de las funciones siguientes:
 - Recepción/expedición. Son vías electrificadas que conectan la terminal con la red ferroviaria.
 - Carga/descarga. Son vías no electrificadas donde se trasbordan unidades de carga desde o hacia las plataformas que componen un tren. Las unidades de carga puede tener como origen/destino otro tren, otro modo de transporte o una zona de almacenamiento.
 - Clasificación. Son vías donde se pueden clasificar las plataformas transportadas por varios trenes entrantes según su próximo destino, consolidar las plataformas transportadas por varios trenes entrantes en un único tren saliente, desconsolidar las plataformas transportadas por un tren entrante en varios trenes salientes o segregar/agregar plataformas de/a un tren entrante para formar un nuevo tren saliente.
 - Estacionamiento. Son vías (generalmente de recepción/expedición o de clasificación) donde se apartan las locomotoras durante las maniobras y donde las plataformas esperan a que se les asigne una vía de carga/descarga o a que se produzca su salida de la terminal.

- Zonas de almacenamiento. Generalmente, toda terminal necesita como mínimo una zona de almacenamiento, debido a que el trasbordo de contenedores (o de cajas móviles) entre modos no siempre es instantáneo. En estas zonas, los contenedores pueden esperar sobre plataformas porta contenedores, semirremolques, plataformas bimodales o directamente sobre el suelo de la terminal. La Figura 2.19 muestra una terminal que utiliza dos zonas de almacenamiento donde los contenedores se colocan sobre el suelo. Una zona está situada al lado de las vías de carga/descarga y la otra está situada a unos metros de estas vías. Ambas zonas están compuestas por pilas de contenedores que se agrupan longitudinalmente formando filas próximas entre sí, lo que constituye una estructura rectangular y compacta que elimina la existencia de pasillos.



Figura 2.19. Zonas de almacenamiento de la terminal de Madrid Abroñigal. Fuente: elaboración propia basada en ADIF (2012c).

- Puertas de entrada/salida de vehículos, que conectan el subsistema ferroviario con la red de carreteras o con el subsistema marítimo/fluvial de una terminal portuaria/fluvial.
- Áreas destinadas al estacionamiento y a la carga/descarga de vehículos, normalmente situadas cerca de las zonas de almacenamiento y de las vías de carga/descarga.

Las instalaciones técnicas descritas en el subapartado 2.5.1 engloban vías con diversas funciones (clasificación, estacionamiento, etc.), mientras que las instalaciones logísticas están formadas por: las zonas de almacenamiento, las zonas de entrada/salida, de aparcamiento y de carga/descarga de vehículos y las infraestructuras ferroviarias necesarias para realizar el intercambio de contenedores (o de cajas móviles) entre modos o trenes.

Adicionalmente, existen otras infraestructuras consideradas fuera del ámbito de estudio de esta tesis, como, por ejemplo, las instalaciones de señalización, de seguridad y de electrificación para las instalaciones técnicas o los edificios de oficinas para las instalaciones logísticas.

Además de infraestructuras, una terminal ferroviaria de contenedores puede disponer de los siguientes recursos (Pérez Herrero, 2001; Camarero Orive y González Cancelas, 2005; Ministerio de Fomento, 2012a):

- Tractores de maniobras (véase la Figura 2.20), empleados para mover las plataformas de los trenes entre las vías electrificadas y no electrificadas de la terminal, consolidar la carga de varios trenes entrantes en un tren saliente, clasificar las plataformas de varios trenes entrantes según su próximo destino, etc.



Figura 2.20. Tractor de maniobras. Fuente: ADIF (2012c).

- Plataformas porta contenedores (véase la Figura 2.21), utilizadas, en el patio de ciertas terminales, para la espera y el transporte de los contenedores (o de las cajas móviles) que no han sido intercambiados entre modos de forma instantánea.



Figura 2.21. Plataforma porta contenedores. Fuente: TERCAT (2012).

- Tractores (véase la Figura 2.22), utilizados para mover plataformas porta contenedores, semirremolques y plataformas bimodales entre las zonas de almacenamiento de una terminal ferroviaria y sus vías de carga/descarga o entre las infraestructuras que componen los subsistemas ferroviario y marítimo o fluvial (muelles, zonas de almacenamiento, etc.) de una terminal portuaria o fluvial de contenedores (véase la Figura 2.22). La unión de este equipo con una plataforma porta contenedores, se denominará, en adelante, tractor con plataforma.



Figura 2.22. Tractor/tractor con plataforma. Fuente: TERCAT (2012).

- Grúas. Las grúas móviles y pórtico son utilizadas con gran frecuencia (véase la Figura 2.23). Las grúas móviles poseen ruedas para moverse entre las distintas zonas que componen la terminal. Además, disponen de una pluma telescópica acabada en un “spreader”, que les permite transportar, elevar y apilar/extraer contenedores (o cajas móviles) situados en varias filas de una zona de almacenamiento. Las grúas pórtico poseen ruedas de goma o metálicas que se mueven sobre raíles. Estas grúas pueden desplazar cajas móviles, contenedores y/o semirremolques vertical, horizontal o lateralmente entre las vías, la zona de almacenamiento y los vehículos que se coloquen en el área de trabajo de su “spreader”.



Figura 2.23. Grúa móvil (a la derecha) y grúas pórtico (a la izquierda). Fuente: ADIF (2012c).

Además de las grúas móviles y pórtico, existen otros equipos para manipular unidades de carga (véase la Figura 2.24). Los cargadores frontales o laterales son los equipos más sencillos y económicos que se pueden utilizar. El cargador frontal coge contenedores (o cajas móviles) en sentido perpendicular al eje de simetría del equipo, mientras que el cargador lateral los coge en sentido paralelo a este eje. Las carretillas pórtico son equipos móviles con un “spreader” bajo sus patas que les permite coger contenedores (o cajas móviles) del suelo o de un vehículo, elevarlos, moverlos por la terminal y apilarlos en una zona de almacenamiento. A diferencia de las grúas móviles y pórtico, los cargadores y las carretillas sólo

pueden apilar contenedores (o cajas móviles) en una fila, lo que implica el diseño de zonas de almacenamiento con pasillos entre filas de contenedores.



Figura 2.24. Cargador frontal (a la derecha), cargador lateral (en el centro) y carretilla pòrtico (a la izquierda). Fuente: TEREX Cranes (2012).

Existen terminales que poseen uno o varios tipos de grúas. Por ejemplo, en el caso español, la terminal de Madrid Abroñigal posee grúas móviles y pòrtico, mientras que la terminal de León Mercancías posee únicamente grúas móviles (ADIF, 2012c).

- Personal, encargado de: gestionar la entrada/salida y el movimiento de camiones o de tractores con plataforma por la terminal, realizar operaciones con grúas, inspeccionar la carga de los trenes antes de su salida, etc.
- Recursos móviles de la red. Dentro de este grupo se encuentran las locomotoras eléctricas o de combustible y los vagones o plataformas (bimodales y no bimodales) que se utilizan para transportar cajas móviles, contenedores, semirremolques y/o camiones completos entre terminales (véase la Figura 2.25). A diferencia de los tractores, de las plataformas porta contenedores y de las grúas, estos recursos son propiedad de los operadores ferroviarios, no de la terminal.



Figura 2.25. Locomotora (a la derecha) y plataforma no bimodal para transportar contenedores (a la izquierda). Fuente: RENFE Operadora (2012a).

Las instalaciones técnicas analizadas en el subapartado 2.5.1 necesitan tractores de maniobras y personal para proporcionar sus servicios, mientras que las instalaciones logísticas pueden necesitar: plataformas porta contenedores, tractores con plataforma, grúas y personal. Los recursos móviles de la red están presentes en ambas instalaciones.

Otros recursos, como, por ejemplo, las básculas para el pesaje de plataformas, han quedado fuera del ámbito de estudio de esta tesis.

2.6. CONCLUSIONES

De este capítulo, se desprenden las siguientes conclusiones para el desarrollo de esta tesis:

- A lo largo de las últimas décadas, el transporte de mercancías por carretera ha experimentado un fuerte crecimiento en Europa y en España en detrimento de otros modos de transporte.
- La Comisión Europea y sus países miembros se encuentran ante el reto de fomentar un uso más racional y equilibrado de los modos de transporte, con el objetivo de garantizar un sistema de transporte sostenible a largo plazo.
- El ferrocarril es una alternativa frente al transporte de mercancías por carretera para desplazamientos a medias y largas distancias. Sin embargo, las medidas aplicadas, en las últimas décadas, para fomentar la transferencia de carga desde la carretera al ferrocarril no han conseguido incrementar el peso relativo de este último modo.
- Las terminales ferroviarias juegan un papel muy importante dentro de una red de transporte, al ser el lugar donde la mercancía cambia de modo. Es por esto que el estudio y la mejora de su funcionamiento puedan ser considerados como aspectos clave a analizar para aumentar el atractivo del transporte ferroviario de mercancías.
- En el caso español, las terminales ferroviarias de contenedores son las más frecuentes y las que mayor volumen de mercancías manejan. Estas terminales suelen diferir, por ejemplo, según los servicios prestados o las infraestructuras y los recursos empleados para la prestación de estos servicios.

En este contexto, el desarrollo de herramientas de planificación estratégica y táctica como la presentada en esta tesis (esto es, capaces de representar diversas terminales ferroviarias de contenedores de forma fiel a la realidad, rápida y sencilla, de prever su capacidad para satisfacer un plan de trenes y de evaluar alternativas de mejora sobre su funcionamiento: cambios en el número de recursos, horarios para la prestación de servicios, etc.) puede ser de gran utilidad para los administradores de estas infraestructuras ferroviarias y para los operadores

ferroviarios a la hora de tomar decisiones que ayuden a mejorar el atractivo del transporte ferroviario de mercancías. Entre estas decisiones se puede encontrar, por ejemplo, el diseño de nuevas terminales para hacer frente a los nuevos flujos de carga que se pretenden transferir desde la carretera al ferrocarril o el rediseño de terminales existentes para mejorar su funcionamiento actual.

Capítulo 3

CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA DE ESTUDIO Y METODOLOGÍA DE TRABAJO

3.1. INTRODUCCIÓN

Según lo expuesto en el capítulo anterior, las medidas destinadas, en las últimas décadas, a impulsar el transporte ferroviario de mercancías no han conseguido frenar su declive frente al transporte por carretera. Por tanto, el reto de fomentar un uso más racional y equilibrado de los modos de transporte sigue estando presente. En esta línea, emerge la necesidad de analizar las redes de transporte ferroviario y las terminales que las componen para potenciar el atractivo de este modo en términos frecuencia, fiabilidad, flexibilidad, costes, etc. y con ello, transferir parte de la carga transportada por carretera al ferrocarril. En este contexto, es donde se enmarca esta tesis y donde se define el problema de estudio que se recoge en el presente capítulo.

Este capítulo se estructura de la forma siguiente. En el apartado 3.2, se identifica la línea de investigación en la que se enmarca esta tesis y se plantea el origen del problema de estudio como resultado de otros trabajos previos. A continuación, en el apartado 3.3, se precisa el sistema de estudio de esta tesis (elegido con anterioridad en el subapartado 2.4.1) para, posteriormente, caracterizar el problema de estudio y concretar su nivel de decisión. Seguidamente, en el apartado 3.4, se justifica el uso de la simulación como técnica para abordar dicho problema. Por último, en el apartado 3.5, se establece la metodología de trabajo que se ha seguido a lo largo del desarrollo de esta tesis.

3.2. ANTECEDENTES, ORIGEN Y PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

La presente tesis se enmarca dentro de una línea de investigación iniciada a finales de los años 90 en el área de Ingeniería de Organización de la universidad Carlos III de Madrid, con el objetivo de contribuir al estudio del transporte ferroviario de mercancías mediante la aplicación de modelos de simulación.

En esta línea, García Gutiérrez (2001) desarrolló un modelo de simulación de la red ferroviaria española de transporte intermodal tren-carretera para analizar el nivel de servicio y la utilización de sus recursos ante escenarios donde variaba tanto el flujo de contenedores enviados entre cada par de terminales origen-destino como las infraestructuras y las políticas de operación de la red (número de terminales que componían la red, localización de las terminales concentradoras de carga, etc.).

Las 51 terminales ferroviarias de contenedores simuladas en este modelo de planificación estratégica poseían características particulares (diferentes funciones, diferente tipo y número de grúas, diferente número de vías, etc.) y aparecían representadas de forma simplificada, pero coherente con el nivel de decisión adoptado.

Este primer trabajo permitió identificar que la dificultad de representar una red ferroviaria de transporte intermodal reside, entre otros factores, en la representación de sus terminales. En un modelo de red con un gran número de nodos, las terminales pueden ser consideradas como módulos. Estos módulos deben ser fácilmente incorporados/eliminados al/del modelo de red, además de ser capaces de representar las características particulares de cada terminal (funciones, tipo y número de equipos, etc.). En la mayor parte de los casos, estas características particulares hacen que las terminales sean únicas, siendo necesario modificar la programación del modelo de simulación inicial (a partir del cual han sido generadas) para implementar un nuevo nodo. De ahí que el modelo de simulación utilizado para generar y estudiar estas terminales sea tanto más útil cuantas más características de diseño y de operación pueda representar y cuanto más fácil sea de modificar.

Del mismo modo, este primer trabajo permitió identificar que el modelo de red desarrollado por García Gutiérrez (2001) podría proporcionar resultados más precisos si sus terminales fueran representadas con más detalle.

En trabajos posteriores, Marín Martínez et al. (2004) y García Sánchez et al. (2006) se centraron en alcanzar un mayor nivel de detalle en la simulación de terminales particulares.

Por un lado, Marín Martínez et al. (2004) representaron los dos haces de vías de carga/descarga que componen la terminal fronteriza de Portbou y las grúas pórtico que trabajan sobre cada uno de ellos, con el objetivo de evaluar cuatro formas alternativas para trasbordar contenedores entre trenes. Esta investigación integraba cuatro modelos de simulación, uno por cada alternativa de operación, que permitían obtener información sobre el tiempo total de trasbordo, las esperas por parte de los trenes y la utilización de las grúas dado un plan de trenes a trasbordar.

Por otro lado, García Sánchez et al. (2006) crearon un modelo de simulación que representaba los elementos (grúas móviles, grúas pórtico, etc.) y el funcionamiento del puerto seco de Coslada. Esta terminal, situada a las afueras de Madrid, está conectada con varios puertos y se dedica a prestar servicios de aduana

y de carga/descarga de camiones y de trenes. En los escenarios analizados, el diseño y las reglas de operación de la terminal permanecían invariables mientras que la demanda era incrementada, con el objetivo de evaluar si dicha terminal era capaz de satisfacerla.

En estos trabajos, además de las características particulares ya comentadas (distintas funciones, distinto tipo y número de grúas, etc.), aparecen nuevas diferencias entre la configuración inicial de ambas terminales (número de modos de transporte involucrados, layout de la terminal, etc.) y entre los distintos escenarios analizados para cada terminal (patrones de llegada/salida de trenes, tiempos de operación de las grúas, etc.). Por ejemplo, la terminal de Coslada posee grúas móviles y pórtico para componer trenes a partir de los contenedores que llegan cargados en camiones, mientras que la terminal de Portbou únicamente posee grúas pórtico para formar trenes a partir de los contenedores que transportan otros trenes.

Estas diferencias agravan el problema de utilizar un único modelo de simulación orientado a simular una terminal particular para representar y analizar de forma fiel a la realidad, rápida y sencilla los distintos tipos de terminales que componen una red ferroviaria, además de evidenciar los beneficios que proporcionaría el diseño y el desarrollo de una herramienta de simulación que tuviera preprogramadas distintas características de diseño y de operación entre las que un decisor pudiera elegir, a través de una interfaz de usuario, para modelar un amplio rango de terminales.

Esta herramienta de simulación permitiría representar una amplia variedad de sistemas sin modificar su programación inicial, lo que agilizaría la creación de los diferentes nodos que componen un modelo de red. Sin embargo, éste no sería el único uso de la herramienta, ya que una herramienta de estas características también sería muy útil para estudiar terminales de forma aislada. En primer lugar, si el objetivo fuera analizar una única terminal, facilitaría la implementación de la configuración inicial y de sus escenarios de mejora. En segundo lugar, si el objetivo fuera estudiar un conjunto de terminales, permitiría implementar fácil y rápidamente cada una de las terminales particulares a estudiar junto a sus correspondientes alternativas de mejora.

La problemática identificada a lo largo de este apartado llevó a centrar el foco de esta tesis en el estudio de las terminales que componen una red ferroviaria de transporte intermodal, con el objetivo de resolver la complejidad que presenta el diseño y el desarrollo de una herramienta de simulación capaz de consolidar dos

cualidades opuestas entre sí, como son: la flexibilidad para representar el diseño y la operación de diversos sistemas con suficiente precisión (lo que potencia la usabilidad de la herramienta al aumentar el número de escenarios que puede representar) y la sencillez en su modificación (lo que elimina la necesidad de reprogramarla para implementar un nuevo escenario). La unión de ambos factores en una misma herramienta ha dado lugar a lo que, en adelante, se denomina plataforma flexible de simulación, esto es, un generador de modelos de simulación que tiene preprogramadas distintas características (número de vías, número de grúas, capacidad de almacenamiento de contenedores, etc.) entre las que un decisor puede elegir, a través de una interfaz de usuario, para configurar un amplio rango de terminales sin necesidad de cambiar su código inicial.

Una plataforma de estas características permitiría que decisores sin conocimientos de programación pudieran modelar, de forma rápida y sencilla, una o varias terminales, analizar su capacidad para satisfacer un plan de trenes y evaluar distintos escenarios alternativos donde cambiara su configuración inicial y/o la demanda. Otra utilidad de esta herramienta es la ya comentada, esto es, la integración de las terminales generadas en un modelo de red, pues esta tesis podría ser utilizada como paso previo para iniciar un estudio más amplio orientado a mejorar el servicio ofrecido por una red ferroviaria de transporte intermodal.

3.3. ALCANCE, CARACTERIZACIÓN Y NIVEL DE DECISIÓN DEL PROBLEMA DE ESTUDIO

En el subapartado 3.3.1, se recuerda el sistema de estudio de esta tesis (elegido con anterioridad en el subapartado 2.4.1) y se precisa el alcance con el que será estudiado. A continuación, en el subapartado 3.3.2, se caracteriza el problema de estudio, clasificando las características particulares que diferencian unas terminales de otras y, por tanto, las características que podrán ser configuradas en la plataforma flexible de simulación creada para resolverlo. A lo largo de esta caracterización, se utilizará información sobre terminales ferroviarias españolas para ejemplificar ciertos conceptos. Esta información ha sido recabada a través de entrevistas con distintos directivos del área de Servicios Logísticos de ADIF y a partir de la web de esta empresa (ADIF, 2012c), donde se recoge información detallada, por ejemplo, sobre los recursos y las infraestructuras disponibles en las terminales de ADIF, los servicios que cada una de ellas presta o los horarios fijados para la prestación de cada servicio. Por último, en el subapartado 3.3.3, se exponen las decisiones que permite apoyar la plataforma flexible de simulación presentada en esta tesis.

3.3.1. ALCANCE

Entre los distintos tipos de terminales expuestos en el subapartado 2.4.1 (terminales ferroviarias, terminales portuarias, terminales fluviales, terminales que manejan granel, terminales que manipulan contenedores, etc.), se han seleccionado las terminales ferroviarias de contenedores como sistema de estudio para esta tesis, al ser, generalmente, las más numerosas dentro de una red ferroviaria y al recibir menos atención en la literatura que otros nodos, como pueden ser las terminales portuarias. El gran número de trabajos relativos a terminales portuarias (véase, por ejemplo, los recogidos en las revisiones bibliográficas presentadas por Vis y Koster, 2003; Steenken et al., 2004; Günther y Kim, 2006; Stahlbock y Voß, 2008 y Angeloudis y Bell, 2011) puede venir motivado por el gran volumen de contenedores que estas terminales suelen manejar y por la existencia de problemas complejos, relativos a su diseño y operación, que necesitan ser resueltos de una forma eficiente. Entre estos problemas se encuentra, por ejemplo, la planificación de la carga de los barcos. Esta tarea requiere que los contenedores que presentan características similares (por ejemplo, tamaño o destinatario) sean cargados en una misma zona y, al mismo tiempo, que su peso esté uniformemente repartido por el barco para que éste no se hunda durante el proceso de carga. Según lo expuesto en el subapartado 2.4.1, las conclusiones que se derivan de la investigación del subsistema marítimo de una terminal portuaria o del subsistema fluvial de una terminal fluvial no suelen ser directamente aplicables sobre el subsistema ferroviario, ya que los subsistemas marítimo y fluvial son cercanos entre sí, pero muy diferentes del subsistema ferroviario en términos de recursos, infraestructuras y operaciones.

Existe una amplia variedad de terminales ferroviarias de contenedores. Esta tesis se centra en aquellos nodos que pueden operar en el interior de una red o dentro de una terminal portuaria o fluvial y dentro de este tipo de terminales, se centra en aquéllas que intercambian contenedores entre modos y que, adicionalmente, pueden actuar como “hub”, trasbordando contenedores entre trenes o formando nuevos trenes salientes a partir de la clasificación, consolidación, desconsolidación, segregación o agregación de las plataformas transportadas por otros trenes entrantes.

Los estudios de terminales pueden desglosarse en tres grupos según el nivel de detalle utilizado para representar sus procesos: estudios de terminales como parte de una red, estudios de terminales aisladas de la red y estudios de una parte de una terminal. Dentro del primer grupo, los procesos aparecen representados de forma bastante simplificada. Por ejemplo, Middelkoop y Bouwman (2001)

consideran las terminales como nodos donde los trenes que circulan por la red consumen tiempo, mientras que García y Gutiérrez (2003) representan sus principales procesos (llegada/salida de contenedores en camiones y en trenes, almacenamiento de contenedores, etc.) de forma sencilla. Generalmente, los procesos aparecen representados con mayor precisión en trabajos donde las terminales son estudiadas de forma aislada de la red que las integra. En esta línea, Ambrosino y Tànfani (2009) modelan los procesos que componen una terminal específica con mayor nivel de detalle que García y Gutiérrez (2003). Por ejemplo, en relación al almacenamiento de contenedores, Ambrosino y Tànfani (2009) representan varias zonas, cada una de ellas dedicada al almacenamiento de contenedores con características homogéneas (mismo próximo modo de transporte, peso, tamaño, etc.), mientras que García y Gutiérrez (2003) no concretan el criterio utilizado para colocar contenedores dentro la única zona de almacenamiento que existe en cada terminal. El nivel de detalle de los procesos representados suele ser aún mayor en trabajos donde se estudia una parte concreta de una terminal. Éste es el caso de Kang et al. (2006) y de Saurí y Martín (2011) que representan sólo la zona de almacenamiento de contenedores de una terminal, con el objetivo de evaluar distintas reglas de operación para determinar la mejor posición de cada contenedor en dicha zona.

En esta tesis, las terminales ferroviarias de contenedores han sido representadas y estudiadas en su conjunto y de forma aislada de la red que las integra. Sus procesos han sido definidos de forma fiel a la realidad y con un nivel de detalle adecuado para apoyar, con suficiente precisión, las decisiones que se recogen en el subapartado 3.3.3. La descripción de los procesos representados se expone con más detalle en el capítulo 5 (modelo conceptual de las terminales a representar con la plataforma flexible de simulación).

3.3.2. CARACTERIZACIÓN

El desarrollo de una plataforma flexible de simulación capaz de representar y de analizar, de forma fiel a la realidad, un amplio conjunto de terminales ferroviarias de contenedores es complejo, debido a las particularidades que cada uno de estos nodos puede presentar.

Günther y Kim (2006) dividen en dos grandes bloques los aspectos en los que pueden diferir las terminales portuarias: diferencias en diseño y diferencias en operación. A su vez, cada uno de estos bloques puede desglosarse según lo expuesto en la Figura 3.1.

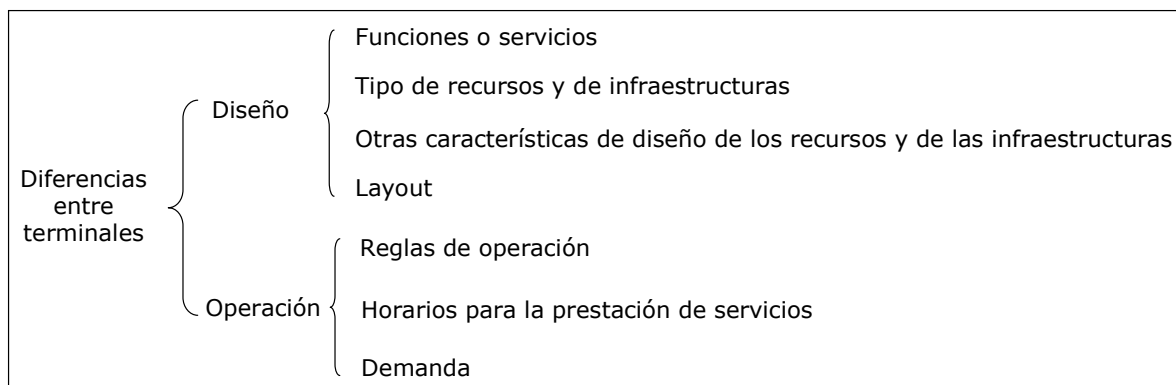


Figura 3.1. Aspectos en los que pueden diferir unas terminales de otras. Fuente: elaboración propia basada en Günther y Kim (2006).

Este desglose también puede emplearse para clasificar las diferencias que existen entre las terminales ferroviarias de contenedores consideradas como objeto de estudio en esta tesis.

Conforme a su diseño, las terminales ferroviarias de contenedores pueden diferir en los siguientes aspectos:

- **Funciones o servicios.** No todas las terminales de una red ferroviaria prestan las mismas funciones o servicios. Por ejemplo, la terminal ferroviaria que está integrada en el puerto de Barcelona puede intercambiar contenedores entre trenes y camiones o entre trenes y tractores con plataforma, mientras que la terminal ferroviaria interior de Barcelona-Morrot sólo intercambia contenedores entre trenes y camiones. También existen diferencias, por ejemplo, entre las funciones de las terminales interiores de Alicante Benalúa y de León Mercancías. Alicante Benalúa únicamente intercambia contenedores entre modos, mientras que León Mercancías, además de intercambiar contenedores entre modos, puede formar nuevos trenes salientes a partir de la clasificación de las plataformas transportadas por otros trenes entrantes. La asignación de funciones tiene un gran impacto sobre los restantes aspectos de diseño de la terminal: recursos, infraestructuras y layout.
- **Tipo de recursos y de infraestructuras.** Según lo indicado en el subapartado 2.5.2, no todas las terminales ferroviarias de contenedores utilizan el mismo tipo de grúas para manipular contenedores. En este caso, pueden existir, por ejemplo, terminales operadas por grúas móviles y pórtico (como Silla Mercancías y Madrid Abroñigal) o terminales atendidas sólo por grúas móviles (como León Mercancías y Murcia Mercancías). La elección de un tipo u otro de grúa condiciona, entre otros aspectos, la productividad y las infraestructuras de la terminal. Por ejemplo, en términos de

infraestructuras, las terminales que disponen únicamente de grúas móviles suelen tener una única zona de almacenamiento de contenedores situada a unos metros de las vías, mientras que las terminales que trabajan con grúas móviles y pórtico suelen disponer de dos zonas, una situada a uno o ambos lados de las vías y otra situada a unos metros de éstas.

- Otras características de diseño relativas a los recursos y a las infraestructuras. Aun teniendo terminales con funciones, recursos e infraestructuras similares, pueden existir diferencias según el número de grúas existentes, el tiempo de operación de cada grúa, el número de vías disponibles, la longitud de las vías, etc. Por ejemplo, las terminales de La Coruña-San Diego y de Vigo-Guixar utilizan grúas móviles y pórtico para intercambiar contenedores entre trenes y camiones. Ambas terminales poseen una grúa móvil. Sin embargo, la terminal de La Coruña-San Diego dispone de una grúa pórtico con dos vías de carga/descarga bajo pórtico, mientras que la terminal de Vigo-Guixar posee dos grúas pórtico con cuatro vías bajo pórtico.
- Layout. Existen diferentes configuraciones de terminal según la cercanía, la lejanía y la disposición de sus elementos. En ciertos casos, esta última característica condiciona la forma de operar de la terminal. Por ejemplo, la zona de almacenamiento de contenedores que está a uno o ambos lados de las vías de carga/descarga puede estar emplazada de tal forma que pueda ser atendida por grúas móviles y pórtico o sólo por grúas pórtico. En la Figura 3.2, se muestra una vista aérea de las terminales de Madrid Abroñigal y de La Coruña-San Diego. Madrid Abroñigal dispone de una zona de almacenamiento a un único lado de las vías con capacidad para almacenar dos filas de contenedores. Esta zona puede ser atendida por grúas móviles y pórtico. En La Coruña-San Diego, existe una zona de almacenamiento a cada lado de las vías con capacidad para almacenar una fila de contenedores. Las grúas pórtico tienen acceso a ambas zonas de almacenamiento, mientras que las grúas móviles sólo pueden acceder a una de ellas, marcada en azul en la Figura 3.2. La otra zona de almacenamiento, marcada en rojo, no es accesible por las grúas móviles, ya que estos equipos no pueden atravesar las vías, ocupadas por trenes, que se encuentran a ambos lados de esta zona de almacenamiento.

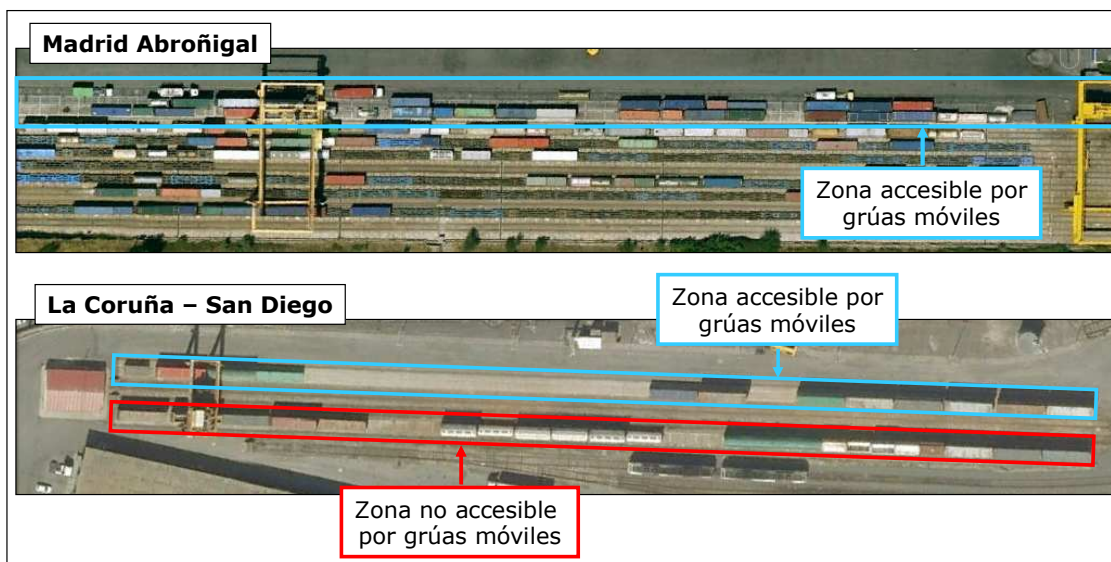


Figura 3.2. Zonas de almacenamiento cerca de las vías de las terminales de Madrid Abroñigal y de La Coruña-San Diego. Fuente: elaboración propia basada en ADIF (2012c).

Además, las terminales ferroviarias de contenedores pueden diferir en los siguientes aspectos de operación:

- Reglas de operación. No todos los nodos de una red ferroviaria desarrollan una misma operación de la misma forma. Por ejemplo, existen terminales que difieren en la forma de colocar contenedores en la zona de almacenamiento que está a unos metros de las vías. De tal forma que, ciertas terminales prefieren almacenarlos, de forma preferente, en superficie, mientras que otras prefieren almacenarlos en altura.
- Horario de prestación de servicios. Aun teniendo terminales con funciones y reglas de operación similares, pueden existir diferencias según el horario de prestación de ciertos servicios. Por ejemplo, según ADIF (2012c), la terminal de Madrid Abroñigal intercambia contenedores entre trenes y camiones de lunes a viernes de 7:00 a 19:00, mientras que la terminal de Silla Mercancías presta este mismo servicio de lunes a viernes de 7:30 a 20:30 y los sábados de 7:00 a 13:00. Estos horarios condicionan, a su vez, los turnos de trabajo del personal de la terminal (personal encargado de gestionar la entrada/salida de camiones/tractores con plataforma, de realizar operaciones con grúas, etc.).
- Demanda. No todas las terminales de una red ferroviaria manipulan el mismo volumen de trenes y de camiones/tractores con plataforma. El volumen de trabajo de una terminal puede condicionar, entre otros aspectos, el tipo y el número de grúas disponibles, sus reglas de operación y los horarios existentes para la prestación de ciertos servicios.

Esta doble vertiente de diferencias evidencia la complejidad que presenta el uso de un modelo de simulación convencional (esto es, un modelo de simulación orientado a representar un sistema concreto) para modelar varias terminales ferroviarias de contenedores y para estudiar la capacidad que estos nodos presentan para satisfacer un plan de trenes, pues habría que reprogramar el modelo tantas veces como terminales hubiera que representar.

Según lo anunciado en el apartado 3.2, para abordar este problema de una forma eficiente, en esta tesis, se propone escapar de los modelos de simulación convencionales, recurriendo, en su lugar, a una plataforma flexible de simulación que tenga preprogramada una amplia gama de alternativas de diseño y de operación entre las que un decisor pueda elegir, a través de una interfaz de usuario, para modelar diversas terminales de forma fiel a la realidad. De ahí que la plataforma desarrollada en esta tesis sea tanto más útil cuantas más alternativas de diseño (distintas funciones/servicios, distintos tipos de recursos y de infraestructuras, distintas características relativas a dichos recursos e infraestructuras y distintos layouts) y de operación (diferentes reglas de operación, diferentes horarios para la prestación de servicios y diferentes patrones para la llegada/salida de trenes y de camiones) sea capaz de representar y cuanto más fácil sea de configurar. La implementación de ambos aspectos en una herramienta informática (flexibilidad para representar diversos sistemas y sencillez en su modificación) se tratan con más detalle en el capítulo 6.

3.3.3. NIVEL DE DECISIÓN

Las decisiones a abordar en esta tesis se caracterizan según los siguientes criterios: contexto de la decisión, nivel de planificación de la decisión y agentes involucrados en la decisión. Esta clasificación ayudará a centrar el capítulo 5 (modelo conceptual de las terminales a representar con la plataforma flexible de simulación), pues los elementos y los procesos que componen la plataforma flexible de simulación deben representar aspectos relevantes para el nivel de decisión considerado en este subapartado.

El contexto de las decisiones a abordar es doble, al tener en cuenta decisiones relacionadas con el diseño y con la operación de las terminales ferroviarias de contenedores consideradas como objeto de estudio en esta tesis. Ambas decisiones están relacionadas entre sí, además de estarlo con las decisiones de diseño y de operación de la red. Por ejemplo, la decisión de operación relativa a aumentar la longitud de los trenes que circulan por la red puede afectar a la operación de las terminales, al tener que dividir las plataformas de los trenes en

varias vías de carga/descarga, si su longitud supera la longitud de diseño de estas infraestructuras.

Según su nivel de planificación, las decisiones pueden clasificarse en tres niveles: estratégico, táctico y operacional. Esta clasificación ha sido utilizada por Crainic y Laporte (1997), Dong (1997) y Caris et al. (2008) para organizar, de la siguiente forma, las decisiones referentes a terminales:

- Nivel estratégico. Estas decisiones se caracterizan por llevar asociadas altas inversiones, tener un gran impacto sobre el diseño y la operación de una terminal y poseer un horizonte de planificación amplio, que varía entre uno y diez años. En este nivel, se encuentran decisiones relacionadas con fijar tarifas para la prestación de servicios, abandonar terminales no rentables, diseñar nuevas terminales, localizar nuevas terminales dentro de una red, dotar de nuevos servicios o funciones a una terminal y ajustar su capacidad, por ejemplo, con la compra de un nuevo equipo.
- Nivel táctico. Este nivel se caracteriza por tratar decisiones que cubren períodos de meses o semanas, donde pueden variar factores como la demanda. El objetivo de este nivel es asignar y utilizar de forma eficiente los recursos y las infraestructuras disponibles. Las decisiones de este nivel abarcan la especificación y la programación de las funciones o servicios ofrecidos por la terminal, la selección o el rediseño de las reglas de operación utilizadas en cada una de sus áreas (zonas de almacenamiento, zona de carga/descarga de trenes, etc.) y la realización de cambios sobre su layout.
- Nivel operacional. Este nivel precisa de un alto grado de información para tomar decisiones del día a día o, incluso, en tiempo real. La asignación dinámica de recursos a tareas y de carga de trabajo a recursos son ejemplos de las decisiones que se contemplan en este nivel.

La plataforma flexible de simulación que se presenta en esta tesis pretende apoyar la toma de decisiones de carácter estratégico y táctico que aparecen representadas en la Figura 3.3. Estas decisiones están relacionadas únicamente con el diseño y el rediseño de terminales ferroviarias de contenedores. Otro tipo de decisiones estratégicas, tácticas u operacionales, como la fijación de tarifas para la prestación de servicios o decisiones en tiempo real relativas a la asignación de recursos a tareas, deberán ser apoyadas con otro tipo de herramientas.

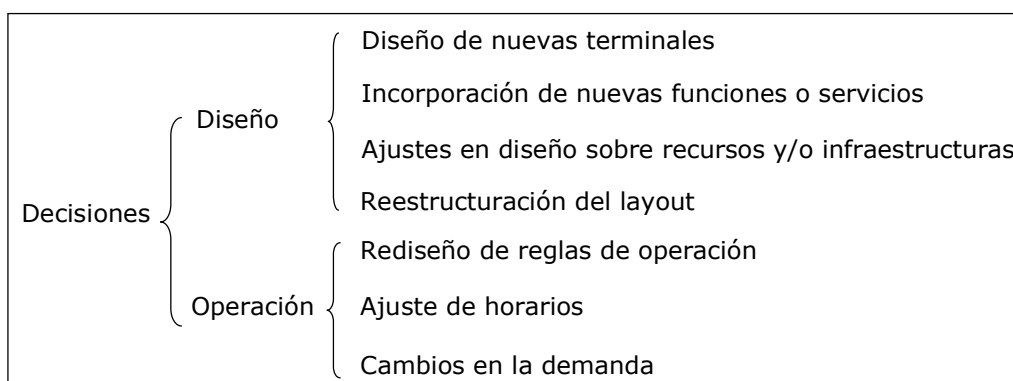


Figura 3.3. Decisiones que permite apoyar la plataforma flexible de simulación desarrollada en esta tesis. Fuente: elaboración propia.

Siguiendo el enfoque propuesto por García Gutiérrez (2001), las decisiones que aparecen en la Figura 3.3 han sido divididas en dos bloques: decisiones de diseño y decisiones de operación.

Las decisiones de diseño hacen referencia a la construcción de nuevas terminales o a la modificación de alguna de las características de diseño, identificadas en el subapartado 3.3.2, para una terminal existente. A su vez, estas decisiones pueden desglosarse en:

- Diseño de nuevas terminales. Antes de construir una nueva terminal ferroviaria de contenedores, suele ser necesario evaluar distintos escenarios alternativos donde varían las características de diseño y de operación enumeradas en el subapartado 3.3.2 (caracterización de problema de estudio).
- Incorporación de nuevas funciones o servicios. Por ejemplo, si existe una terminal que intercambia contenedores entre tren-carretera usando grúas pórtico, puede analizarse la capacidad de estas grúas para intercambiar también contenedores entre trenes. Esta nueva función permitiría a la terminal estudiada actuar como concentrador de carga o “hub” de una red.
- Ajuste de alguna característica relativa al diseño de los recursos y/o de las infraestructuras. Si existen cuellos de botella a la hora de satisfacer un plan de trenes, la capacidad de una terminal puede ser ampliada, realizando distintos ajustes sobre sus recursos e infraestructuras (por ejemplo, adquiriendo nuevas grúas, ampliando la capacidad de las zonas de almacenamiento de contenedores, etc.). En caso de existir capacidad ociosa, puede reducirse el número de recursos y de infraestructuras en uso, con el objetivo, por ejemplo, de destinar las infraestructuras y los recursos sobrantes a otras funciones o, incluso, a otras terminales.

- **Reestructuración del layout.** Por ejemplo, en una terminal donde las grúas móviles no tienen acceso a la zona de almacenamiento de contenedores que está a uno o ambos lados de las vías, se pueden reubicar las infraestructuras que están bajo las grúas pórtico (zona de almacenamiento y vías), de tal forma que las grúas móviles y pórtico tengan acceso a la zona de almacenamiento y posteriormente, evaluar la repercusión de este cambio sobre el funcionamiento de la terminal.

El segundo grupo de decisiones que aparece en la Figura 3.3 hace referencia a la modificación de alguna de las características de operación de una terminal existente o a cambios en las necesidades de transporte de sus clientes (operadores ferroviarios y/o operadores logísticos). Estas decisiones pueden desglosarse en:

- **Rediseño de reglas de operación.** En ciertos casos, puede ser interesante evaluar formas alternativas de realizar una misma tarea (gestión de las zonas de almacenamiento de contenedores, asignación de grúas móviles a haces de vías de carga/descarga, etc.), con el objetivo de comprobar cuál proporciona mejores resultados.
- **Ajuste de horarios.** Por ejemplo, puede cambiarse el horario asignado a la prestación de un servicio o el turno de trabajo de una grúa para evaluar si el nivel de servicio de una determinada terminal mejora.
- **Cambios en la demanda.** Distintos cambios en el plan de trenes (cambios en los horarios, en las longitudes de trenes, etc.) pueden ser evaluados, por ejemplo, para mejorar el atractivo del transporte ferroviario o para equilibrar la carga de trabajo de una terminal. Del mismo modo, pueden evaluarse escenarios donde las preferencias para entregar/retirar contenedores varíen, haciendo, por ejemplo, que una terminal pueda ser utilizada como una zona de almacenamiento prolongado de contenedores.

Las decisiones de rediseño expuestas anteriormente pueden darse de forma individual o combinada entre sí. En ambos casos, cada cambio en una terminal daría lugar a un nuevo escenario que debería ser representado y evaluado usando la plataforma flexible de simulación, para, posteriormente, compararlo con la situación inicial y determinar si cada nueva configuración mejora su funcionamiento. Este procedimiento iterativo de estudio será detallado y ejemplificado en el capítulo 8 (experimentación con la plataforma flexible de simulación).

Por último, es importante destacar que las decisiones consideradas en esta tesis son complejas, no sólo por el gran número de características de diseño y de operación que contemplan, sino por el alto número de agentes públicos y privados involucrados (empresas administradoras de infraestructuras, operadores ferroviarios, etc.).

La plataforma flexible de simulación presentada en esta tesis puede ser de gran utilidad para las empresas encargadas de administrar terminales a la hora de apoyar decisiones relativas a su diseño y rediseño. Del mismo modo, como el funcionamiento de estas terminales depende tanto de la gestión realizada por sus administradores como de las interacciones que existen con los operadores ferroviarios, la plataforma flexible desarrollada puede ser también utilizada para evaluar decisiones que afectan a ambos agentes, con el objetivo, por ejemplo, de analizar la viabilidad, a nivel de terminal, de introducir nuevos trenes o nuevas rutas de trenes que precisen consolidar carga procedente de varios orígenes para ser rentables.

3.4. LA SIMULACIÓN COMO TÉCNICA PARA ESTUDIAR TERMINALES FERROVIARIAS DE CONTENEDORES

En este apartado, se presentan distintos enfoques para estudiar terminales ferroviarias de contenedores y se justifica el uso de la simulación como técnica para estudiar un conjunto variado de terminales y para apoyar la toma de decisiones de carácter estratégico y táctico que se recogen en el apartado 3.3.

Existen distintas técnicas para estudiar un sistema, por ejemplo, una terminal ferroviaria de contenedores. Según Law (2007), estas técnicas pueden dividirse en dos bloques. Uno basado en experimentar con el sistema real y otro relacionado con construir un modelo del sistema para experimentar con él (véase la Figura 3.4).

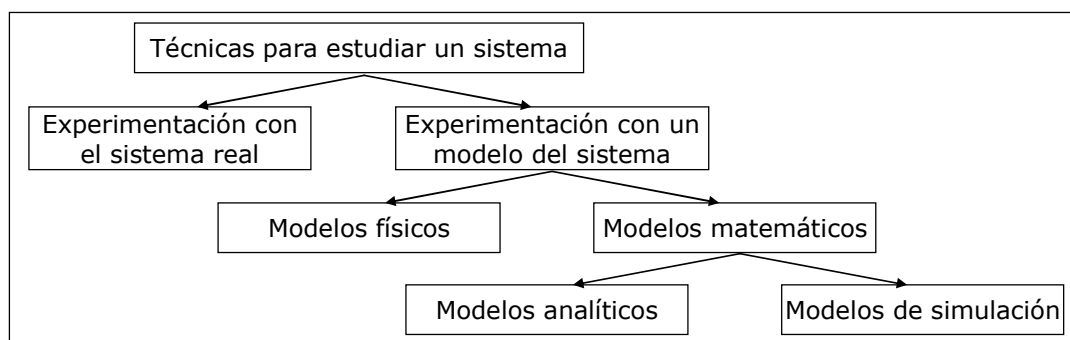


Figura 3.4. Técnicas para estudiar un sistema. Fuente: elaboración propia basada en Law (2007).

La experimentación con un sistema real puede emplearse para evaluar configuraciones alternativas sobre su diseño y/o operación. Sin embargo, esta técnica suele tener escasa aplicación por llevar asociados grandes costes o ser perjudicial para el funcionamiento actual del sistema. Por ejemplo, si existiera una terminal ferroviaria de contenedores con exceso de grúas, podría evaluarse el efecto de reducir su número o sus turnos de trabajo. Sin embargo, la implementación directa de estas medidas podría repercutir negativamente sobre el nivel de servicio actual, haciendo que ciertos trenes no fueran cargados a tiempo. Otro inconveniente de esta técnica es que sólo podía llevarse a cabo sobre sistemas ya existentes, no sobre propuestas para nuevas instalaciones (Kozan, 1997a).

Por esta razón, lo habitual es construir un modelo que represente las entidades y las relaciones que componen el sistema de estudio y que pueda ser utilizado como herramienta de apoyo para la toma de decisiones (Kozan, 1997a).

En esta línea y según lo indicado en la Figura 3.4, pueden desarrollarse modelos físicos o modelos matemáticos. Los modelos físicos se conciben como un montaje de objetos reales que trata de reproducir el funcionamiento de un sistema físico más complejo. Un ejemplo sería una maqueta que ayudara a tomar decisiones sobre la disposición en planta de los recursos y las infraestructuras de una terminal ferroviaria de contenedores. Por el contrario, los modelos matemáticos representan la realidad en términos numéricos y fórmulas matemáticas. Estos últimos son los más adecuados para abordar las decisiones de diseño y de operación que se tratan en esta tesis.

A su vez, los modelos matemáticos se pueden desglosar en modelos analíticos y modelos de simulación según la técnica aplicada para resolverlos (véase la Figura 3.4).

Los modelos analíticos pueden plantearse como un problema de optimización, donde se pretende determinar el valor de un conjunto de variables decisión, de tal forma que se satisfaga una lista de restricciones y se proporcione el mejor valor de una función objetivo.

Según Hillier y Lieberman (2010), los modelos analíticos pueden resolverse mediante métodos exactos, heurísticos o metaheurísticos.

En la literatura, existen múltiples modelos analíticos relativos a terminales ferroviarias y portuarias cuya solución ha sido obtenida usando métodos exactos. Por ejemplo, Kim y Kim (1999) presentan varios modelos analíticos para determinar la ubicación de los contenedores en la zona de almacenamiento de una

terminal portuaria, de tal forma que se minimice el número de manipulaciones en su posterior extracción; Kozan (2000) analiza la descarga de barcos y la salida de sus contenedores en camión o en tren, utilizando un modelo de programación lineal que permite determinar el flujo óptimo de contenedores que deben almacenarse y moverse entre cada zona de la terminal, para minimizar su tiempo total de manipulación y transporte; mientras que Bruns y Knust (2012) utilizan un modelo basado en programación lineal entera para asignar contenedores a las plataformas de un tren, de tal forma que su ocupación sea máxima y los costes de asignación y de transporte sean mínimos.

En problemas más complejos, donde el tiempo de resolución es un factor importante, suelen aplicarse métodos heurísticos en lugar de técnicas exactas. Los heurísticos determinan una o varias soluciones factibles que se aproximan al óptimo, aunque pueden no llegar a alcanzarlo. Por ejemplo, Alicke (2002) emplea varios algoritmos heurísticos para resolver un problema de satisfacción de restricciones destinado a asignar tareas a las grúas pórtico que intercambian contenedores entre trenes en una terminal ferroviaria; Lee et al. (2006b) aplican dos heurísticos para resolver un problema de programación lineal entera mixta dedicado a colocar contenedores en la zona de almacenamiento de una terminal portuaria; mientras que Liang et al. (2009) utilizan un algoritmo heurístico para resolver un problema de programación entera encargado de asignar trabajo a los recursos que descargan barcos y almacenan sus contenedores en una terminal portuaria.

El uso de métodos heurísticos puede presentar inconvenientes en problemas donde el espacio de soluciones a explorar es muy extenso (por ejemplo, en un problema complejo de carácter combinatorio) y en problemas donde existen óptimos locales, ya que el procedimiento de búsqueda puede converger a un óptimo local y detenerse sin llegar a aproximarse al óptimo global del problema. Para mejorar los resultados proporcionados por los métodos heurísticos, se pueden utilizar métodos metaheurísticos que combinan procedimientos de búsqueda local con estrategias de mayor nivel para escapar de dichos óptimos locales y explorar de forma más eficiente el espacio factible de soluciones. Al igual que los métodos heurísticos, los metaheurísticos no garantizan que la mejor solución encontrada sea una solución óptima del problema. Ejemplos relativos a la aplicación de técnicas metaheurísticas para el estudio de terminales de transporte intermodal pueden encontrarse en: Zeng y Yang (2007), Han et al. (2008) y Kellner et al. (2010). Zeng y Yang (2007) proponen una búsqueda tabú para resolver un modelo matemático formulado para asignar trabajo a las grúas y rutas a los tractores con

plataforma que operan en una terminal portuaria; Han et al. (2008) presentan una búsqueda tabú para resolver un modelo matemático propuesto para colocar contenedores en la zona de almacenamiento de una terminal portuaria; mientras que Kellner et al. (2010) aplican un algoritmo genético para resolver un modelo matemático creado para gestionar el movimiento de trenes por las vías de una terminal ferroviaria.

Generalmente, los modelos analíticos suelen representar problemas de carácter operacional relacionados con una zona específica de una terminal. Por ejemplo, muchos autores han empleado modelos analíticos para estudiar la carga/descarga de trenes (véase, por ejemplo, Bostel y Dejax, 1998; González et al., 2008 y Ambrosino et al., 2011) o el almacenamiento de contenedores (véase, por ejemplo, Preston y Kozan, 2001; Zhang et al., 2003; Saurí y Marín, 2011; Jiang et al., 2012 y Rashidi y Tsang, 2013). Los modelos analíticos empleados para estudiar terminales de transporte intermodal al completo suelen ser menos numerosos y, en caso de ser planteados, suelen asumir fuertes simplificaciones (véase, por ejemplo, Bish, 2003; Froyland et al., 2008 y Wong y Kozan, 2010). Estas simplificaciones pueden influir en la precisión de sus resultados.

La simulación puede ser utilizada para modelar terminales ferroviarias de contenedores con un nivel de detalle suficiente como para proporcionar información sobre problemas operacionales, tácticos y estratégicos relativos a su diseño y operación (véanse los trabajos recogidos en las revisiones bibliográficas presentadas por Ferreira, 1997; Bontekoning et al., 2004; Macharis y Bontekoning, 2004; Caris et al., 2008 y Boysen et al., 2011 para cada uno de estos niveles de planificación).

Esta técnica cuantitativa requiere del uso de ordenadores para imitar el comportamiento de un sistema real y para predecir el efecto que tendrían ciertos cambios sobre su configuración inicial, lo que se denomina búsqueda de alternativas de mejora basadas en un análisis "qué pasaría si" ("what-if").

Entre los distintos tipos de simulación que existen, la simulación de eventos discretos es la más utilizada para estudiar terminales ferroviarias de contenedores. Esta técnica modela el sistema de estudio mediante un conjunto de variables de estado que cambian de valor de manera instantánea en el tiempo cuando ocurre un evento o suceso. Por ejemplo, un evento sería la entrada de un camión en una terminal, lo que incrementaría el número de vehículos que están en espera de ser atendidos y la lista de trabajos pendientes para las grúas.

La simulación no proporciona la solución óptima de un problema. Sin embargo, presenta las siguientes ventajas generales para el estudio de un sistema (Pardo y Valdés, 1987; Banks, 1998):

- La simulación permite representar sistemas complejos que no pueden ser modelados de forma analítica por contemplar sucesos estocásticos o por existir interdependencias o interrelaciones complicadas entre sus componentes.
- Utilizando simulación puede representarse un sistema real y experimentar nuevos escenarios donde varíe su diseño, su operación o la demanda a la que está sometido sin introducir estos cambios en el sistema real.
- La simulación permite modelar y analizar nuevos sistemas como paso previo a su implementación real.
- El uso de simulación permite tener en cuenta eventualidades que podrían no aparecer en un sistema real a la hora de experimentar directamente con él.
- Si se quiere analizar un sistema que evoluciona lentamente, la simulación permite estudiarlo en un período corto de tiempo. También, permite estudiar sistemas que evolucionan rápido de forma detallada.
- La simulación permite evaluar sistemas dinámicos en tiempo real.
- El uso de simulación con representación gráfica y animación facilita la visualización y la comprensión del modelo, lo que aumenta el grado de credibilidad de sus resultados.

Para el problema que se plantea en esta tesis, esto es, representar y estudiar distintas terminales ferroviarias de contenedores, es de especial interés la capacidad que la simulación tiene para imitar los detalles de diversos sistemas y para representar procesos tan complejos como los presentes en una terminal, las interrelaciones que existen entre ellos y las fuentes de aleatoriedad que los pueden afectar (retrasos en la entrada de los trenes a una terminal, tasa de averías de las grúas, etc.)

Además, usando simulación, pueden crearse modelos capaces de representar terminales ferroviarias de contenedores en su conjunto, con la suficiente precisión, como para conectar distintos niveles de decisión (por ejemplo, estratégico y táctico). De tal forma que un mismo modelo podría ser utilizado, en primer lugar, para evaluar el funcionamiento actual de una terminal, pudiendo ser,

posteriormente, modificado para analizar qué efecto tendría la adquisición de una nueva grúa o un cambio sobre sus reglas de operación.

3.5. METODOLOGÍA PARA LA CONSECUCIÓN DE LOS OBJETIVOS DE LA TESIS

Tras caracterizar el problema de estudio y justificar la aplicación de la técnica cuantitativa utilizada para resolverlo, se recuerdan los objetivos de esta tesis y se expone la metodología empleada para su consecución.

Según lo recogido en el apartado 1.2, esta tesis tiene por objetivo determinar la viabilidad de construir una plataforma flexible de simulación que permita modelar, a partir de la información introducida por un decisor en una interfaz de usuario, un rango de terminales ferroviarias de contenedores mayor que el representado por otras herramientas de simulación encontradas en la literatura y que pueda ser utilizada como herramienta de apoyo para la toma de decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y al rediseño de las terminales representadas.

Este objetivo general se concreta en los objetivos particulares que se recogen en el apartado 1.2 y que se recuerdan a continuación:

- Estudiar los modelos de simulación propuestos por otros autores para apoyar problemas de planificación estratégica y táctica relativos a terminales, con el propósito de determinar su grado de flexibilidad para representar varios sistemas.
- Explorar las similitudes y las diferencias, en términos de diseño y de operación, presentes en las terminales ferroviarias de contenedores que operan en el mundo.
- Diseñar y desarrollar una plataforma flexible de simulación que sirva de ayuda para la toma de decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y al rediseño de múltiples terminales ferroviarias de contenedores. La plataforma flexible de simulación debe cumplir los siguientes propósitos:
 - Representar fielmente la operación de diversas terminales ferroviarias que intercambian contenedores entre el ferrocarril y al menos otro modo de transporte (carretera, marítimo y/o fluvial). Adicionalmente, estas terminales podrán transferir contenedores entre trenes y/o formar trenes

salientes a partir de la clasificación de los vagones transportados por otros trenes entrantes.

- Disponer de una interfaz de usuario para configurar las terminales a simular según sus características de diseño (funciones, infraestructuras, recursos y layout), reglas de operación, horarios de trabajo y demanda.
- Proporcionar indicadores que permitan evaluar el funcionamiento de las terminales representadas.
- Facilitar su modificación y ampliación futura, así como la integración de las terminales generadas en un futuro modelo de red.
- Evaluar escenarios donde varíe la demanda y/o la configuración de las terminales a simular, con el objetivo de comprobar la utilidad del enfoque aplicado para construir la plataforma flexible, así como el interés de sus resultados.

La Figura 3.5 resume la metodología aplicada a lo largo de esta tesis para la consecución de los objetivos expuestos anteriormente. A continuación, se explica de forma general cada una de sus fases, proporcionando más detalles en los apartados o capítulos que corresponda.

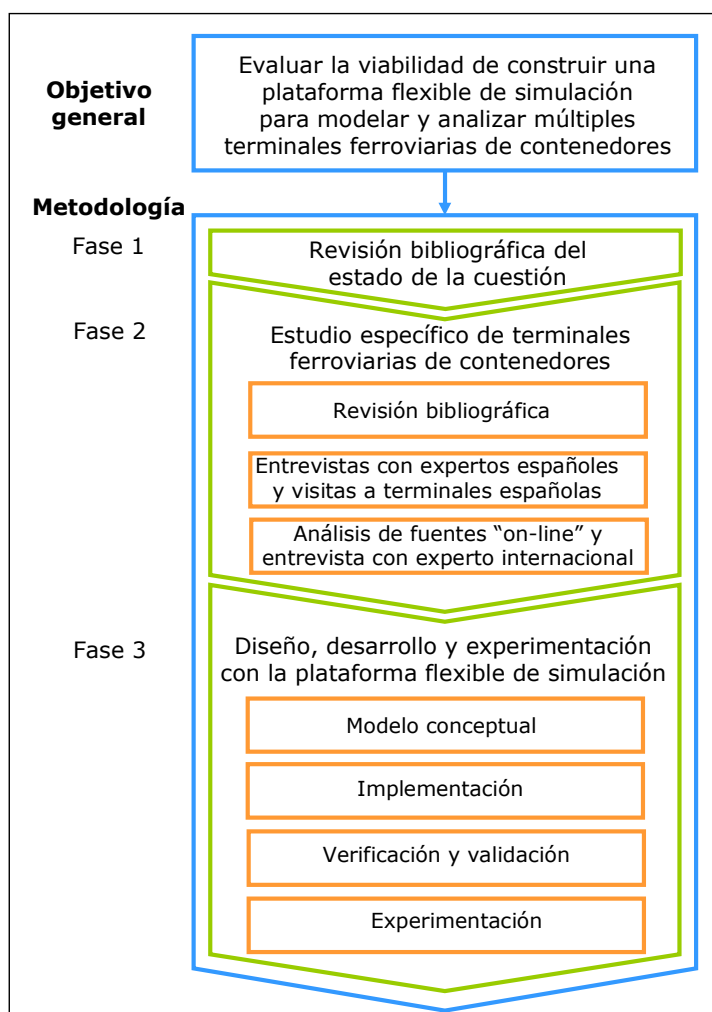


Figura 3.5. Metodología de trabajo. Fuente: elaboración propia.

En la primera fase de la metodología ("Revisión bibliográfica del estado de la cuestión"), se han analizado los modelos de simulación empleados en la literatura para estudiar problemas estratégicos y tácticos relativos al diseño y al rediseño de terminales. Este análisis, que se recoge en el apartado 4.2, pretende verificar la originalidad y el interés de la plataforma flexible de simulación creada para resolver el problema de estudio planteado a lo largo del presente capítulo.

Para desarrollar una plataforma flexible capaz de representar, con suficiente precisión, múltiples terminales ferroviarias de contenedores, es necesario conocer a fondo dicho sistema. De ahí que la segunda fase de la metodología ("Estudio específico de terminales ferroviarias de contenedores") se haya centrado en estudiar el diseño y la operación de diversas terminales ferroviarias de contenedores que operan en el mundo. Este estudio, que se recoge en el capítulo 4, se ha realizado usando tres fuentes de información: revisión bibliografía, entrevistas con expertos españoles en transporte ferroviario de contenedores y visitas a terminales españolas, y análisis de fuentes "on-line" y entrevista con un experto internacional.

La literatura revisada en la primera fase de la metodología ha proporcionado una visión general sobre el sistema a analizar, permitiendo identificar sus principales procesos, infraestructuras, recursos, alternativas de diseño, etc.

Para lograr una definición más detallada del sistema de estudio, se han mantenido entrevistas con expertos en transporte ferroviario de contenedores de RENFE Operadora (principal operador ferroviario español) y de ADIF (empresa pública española encargada de administrar las infraestructuras ferroviarias). Adicionalmente, se han visitado tres terminales ferroviarias de contenedores de ADIF.

El estudio de casos reales es una técnica cada vez más aceptada como instrumento de investigación científica. Por ejemplo, Yin (2003) identifica que esta técnica es adecuada cuando las cuestiones planteadas en la investigación son de tipo cómo o por qué, cuando el problema se centra en un fenómeno contemporáneo dentro del contexto de la vida real (en oposición a un fenómeno histórico) y cuando el investigador tiene poco control sobre los eventos que ocurren en el caso de estudio. En esta tesis, el estudio de casos reales ha permitido acceder a información completa y de primera mano sobre procesos tan complejos como los relativos a la operación y a la gestión de una terminal ferroviaria de contenedores, lo que ha enriquecido el estudio específico de terminales (capítulo 4) en el que se ha basado el desarrollo del modelo conceptual de las terminales a representar con la plataforma flexible de simulación (capítulo 5).

Otros autores, como Verschuren (2003), manifiestan la dificultad de generalizar los resultados proporcionados por un conjunto reducido de casos reales. Para mitigar esta falta de generalidad, el estudio específico de terminales se ha completado con el análisis de diversas fuentes “on-line” que recogen información adicional sobre el sistema de estudio y con los resultados de una entrevista mantenida con un experto que trabaja para un operador ferroviario alemán. Esta tercera fuente de información ha permitido, entre otros aspectos, estudiar nuevas terminales ferroviarias españolas e internacionales no encontradas en la literatura ni en el estudio de casos reales.

Después de haber formulado el problema de estudio de esta tesis (capítulo 3) y de haber analizado, en detalle, las terminales ferroviarias de contenedores que operan en diversos países (capítulo 4), se inició la tercera fase de la metodología recogida en la Figura 3.5 (“Diseño, desarrollo y experimentación con la plataforma flexible de simulación”).

A su vez, esta fase se ha dividido en cuatro subfases: “Modelo conceptual”, “Implementación”, “Verificación y validación” y “Experimentación”, de aplicación general para el desarrollo de una herramienta de simulación (véase, por ejemplo, Khoshnevis, 1994; Banks et al., 2001; Pidd, 2004 y Law, 2007).

En la subfase de “Modelo conceptual”, recogida en el capítulo 5, se han empleado los resultados del capítulo 4 para describir las características de diseño y de operación de las terminales ferroviarias de contenedores a representar con la plataforma flexible de simulación. Los elementos que componen las terminales a estudiar y las relaciones que existen entre ellos se han definido con un nivel de detalle coherente con los objetivos de estudio indicados en el apartado 3.3. El modelo conceptual desarrollado ha servido como paso previo para abordar la subfase de “Implementación”.

En la subfase de “Implementación”, que se detalla en el capítulo 6, se han identificado los elementos que componen la plataforma flexible de simulación y el software empleado para implementarlos. La programación de la plataforma flexible de simulación se ha realizado de forma gradual, comenzando con distintos prototipos. El primer prototipo creado permitía modelar y estudiar terminales ferroviarias que intercambiaban contenedores entre trenes y camiones usando grúas móviles y pórtico (García y García, 2009). Los procesos simulados estaban representados con menor nivel de detalle que los definidos en el capítulo 5. Además, este prototipo sólo permitía configurar terminales donde variaban parte de las características de diseño y de operación citadas en el subapartado 3.3.2. Estas simplificaciones vienen motivadas porque no se pretendía construir un prototipo con las mismas funcionalidades que la plataforma flexible final, sino construir un prototipo que pudiera servir para verificar, de forma rápida, si los softwares elegidos eran adecuados para crear una plataforma flexible capaz de configurar características similares a las encontradas en otras plataformas flexibles de simulación encontradas en la literatura. Los resultados de este primer trabajo sirvieron como punto de partida para extender el enfoque flexible de simulación a otros niveles. Por ejemplo, en posteriores prototipos, se modificó la plataforma flexible presentada en García y García (2009) para determinar la viabilidad de representar terminales donde sus puertas de entrada/salida de camiones/tractores con plataforma pudieran trabajar siguiendo varias reglas de operación (véanse más detalles sobre este cambio en el apartado 6.4 y en García-Hernández y García-Gutiérrez, 2012) o terminales donde, además de cargarse/descargarse trenes y camiones, pudieran clasificarse plataformas (véanse más detalles sobre este cambio en el apartado 6.4 y en García y García, 2012). Tras el éxito de estos

prototipos, se dio paso a la programación de la plataforma flexible finalmente presentada en esta tesis.

En la subfase de “Verificación y validación”, desarrollada a lo largo del diseño y del desarrollo de la plataforma flexible de simulación y recogida en el capítulo 7, se han aplicado distintas técnicas para garantizar que las asunciones realizadas sobre el sistema de estudio, al construir el modelo conceptual, son adecuadas con los objetivos planteados, que la programación de la plataforma flexible de simulación es correcta y que los resultados que se desprenden de la plataforma flexible son coherentes con los del sistema real a simular. Dentro de este último bloque de técnicas, se ha realizado una validación cuantitativa de los resultados proporcionados por la plataforma flexible. Para el desarrollo de esta validación, ha sido necesario aplicar un enfoque experimental y un procedimiento estadístico para analizar los resultados de la simulación, ya que ciertos datos de entrada a la plataforma flexible (patrón de llegadas para los camiones, tiempos de operación de las grúas, etc.) variaban de forma aleatoria. Los pasos seguidos para llevar a cabo la validación cuantitativa de los resultados proporcionados por la plataforma flexible se explican, con más detalle, a lo largo del apartado 7.5.

Después de validar los resultados de la plataforma flexible, se ha empleado esta herramienta para analizar un conjunto de escenarios que evidencien su utilidad para configurar distintas terminales ferroviarias de contenedores y para proporcionar información que ayude a la toma de decisiones estratégicas y tácticas relativas a su diseño y rediseño. El capítulo 8 recoge una muestra de los escenarios que pueden ser estudiados con la plataforma flexible de simulación creada.

Capítulo 4

REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN Y ESTUDIO ESPECÍFICO DE TERMINALES FERROVIARIAS DE CONTENEDORES

4.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo cubre las dos primeras fases de la metodología recogida en el apartado 3.5 (“Revisión bibliográfica del estado de la cuestión” y “Estudio específico de terminales ferroviarias de contenedores”).

En el apartado 4.2, se revisan los modelos de simulación empleados, en la literatura, para analizar terminales de transporte intermodal, prestando especial atención a los modelos que apoyan decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y a la operación de terminales ferroviarias de contenedores. Esta revisión pretende verificar la originalidad y el interés de la plataforma flexible de simulación presentada en esta tesis, además de recabar información sobre el sistema de estudio. Como la literatura revisada contempla terminales de todo el mundo, esta fuente de información puede ser utilizada para establecer similitudes y diferencias entre las terminales que operan en distintos países.

De forma complementaria a la revisión bibliográfica, se han mantenido entrevistas con expertos españoles en transporte ferroviario de contenedores y se han visitado tres terminales españolas para obtener información adicional sobre el sistema de estudio. Estas entrevistas y visitas han permitido recabar información precisa y detallada sobre el funcionamiento de diversas terminales y establecer nuevas similitudes y diferencias entre ellas. Los resultados de este estudio se recogen en el apartado 4.3.

Por último, el apartado 4.4 presenta las conclusiones que se desprenden del análisis de distintas fuentes “on-line” que recogen información sobre diversas terminales españolas e internacionales y de entrevistar a un experto internacional en transporte ferroviario de contenedores. Esta tercera fuente de información ha permitido expandir y corregir las conclusiones obtenidas a partir de la revisión bibliográfica, de las entrevistas con expertos españoles y de las visitas a terminales reales.

Las conclusiones que se derivan de las tres fuentes de información analizadas a lo largo del estudio específico de terminales (revisión bibliografía, entrevistas con expertos españoles en transporte ferroviario de contenedores y visitas a terminales españolas, y análisis de fuentes “on-line” y entrevista con un experto internacional) serán utilizadas, en el capítulo 5, para definir el modelo conceptual de las terminales a representar con la plataforma flexible de simulación presentada en esta tesis.

4.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN

En el subapartado 4.2.1, se revisan los modelos de simulación publicados sobre terminales de transporte intermodal con un doble objetivo: recabar información sobre el sistema de estudio y verificar la originalidad y el interés de la plataforma flexible de simulación desarrollada en esta tesis. De ahí que los subapartados 4.2.2 y 4.2.3 recojan conclusiones relativas a estos dos objetivos.

4.2.1. LITERATURA REVISADA

Una revisión general de las investigaciones publicadas sobre terminales de transporte intermodal revela que la mayor parte de estos trabajos hacen referencia a terminales portuarias, no a terminales ferroviarias. Vis y Koster (2003), Steenken et al. (2004), Günther y Kim (2006), Stahlbock y Voß (2008) y Angeloudis y Bell (2011) revisan distintos problemas de decisión relativos a terminales portuarias, junto a los modelos desarrollados para estudiarlos; mientras que Ferreira (1997), Bontekoning et al. (2004), Macharis y Bontekoning (2004), Caris et al. (2008) y Boysen et al. (2011) realizan una revisión similar para terminales ferroviarias.

En los trabajos revisados por estos autores, es frecuente utilizar la simulación como técnica para evaluar los resultados proporcionados por otros modelos analíticos. Éste es el caso de Boysen et al. (2010), que emplean un modelo de simulación para evaluar los resultados que proporciona un algoritmo de programación dinámica encargado de determinar el área de trabajo óptima para las grúas pórtico que intercambian contenedores entre trenes en una terminal ferroviaria, o de Chang et al. (2011), que utilizan un modelo de simulación para analizar los resultados que proporciona un algoritmo heurístico encargado de asignar tareas a las grúas que trabajan en el patio de una terminal portuaria. Kozan (1997b), Alicke (2002), Corry y Kozan (2006), Corry y Kozan (2008) y Boysen y Fliedner (2010) presentan otros ejemplos relacionados con este uso de la simulación para terminales ferroviarias; mientras que Gambardella et al. (1998), Gambardella et al. (2001), Saanen y Valkengoed (2005), Bielli et al. (2006), Grunow et al. (2006), Zhang y Jiang (2008), Wiese et al. (2009), Park et al. (2010) y Ambrosino y Tànfani (2012) presentan ejemplos similares para terminales portuarias.

En otros casos, la simulación se utiliza para evaluar los resultados proporcionados por uno o varios sistemas expertos. Por ejemplo, Koh et al. (1994) usan un modelo de simulación para evaluar las reglas marcadas por los sistemas expertos que gestionan la operación de una terminal portuaria; mientras que Ballis

y Golias (2002), Abacoumkin y Ballis (2004) y Ballis y Golias (2004) emplean modelos de simulación para evaluar las alternativas de diseño propuestas por un sistema experto para una terminal ferroviaria de contenedores.

Otros autores emplean la simulación por sí sola como técnica para estudiar problemas operacionales, tácticos o estratégicos. La plataforma flexible de simulación desarrollada en esta tesis ejemplifica este uso de la simulación, permitiendo apoyar decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y al rediseño de terminales. La siguiente revisión se ha centrado en analizar modelos de simulación con un nivel de planificación similar.

La flexibilidad es otro factor que caracteriza a la plataforma presentada en esta tesis. Según este factor, los modelos de simulación empleados, en la literatura, para estudiar decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y al rediseño de terminales de transporte intermodal pueden clasificarse en dos categorías: modelos de simulación no flexibles y plataformas flexibles de simulación. Según se expuso en el apartado 3.2, los modelos de simulación no flexibles representan y estudian una terminal particular, siendo necesario modificar su código para simular un nuevo escenario o una nueva terminal. Esta característica reduce la usabilidad del modelo, por una parte, al incrementar el tiempo y el coste necesario para adaptarlo a un nuevo sistema de estudio y, por otra, al requerir conocimientos de programación para llevar a cabo dicha adaptación. Según lo indicado en el apartado 3.2, las plataformas flexibles de simulación permiten mitigar estos problemas, al tener preprogramadas distintas características entre las que un decisor puede elegir para configurar, de forma rápida y sencilla y sin necesidad de cambiar su programación inicial, un rango más o menos amplio de terminales. En esta tesis, se supone que los modelos incluidos en esta segunda categoría presentan una interfaz de usuario para configurar las características de las terminales a simular. La herramienta desarrollada en esta tesis se incluye en esta segunda categoría.

En los siguientes dos bloques, se estudian los modelos de simulación no flexibles y las plataformas flexibles de simulación empleadas, en la literatura, para representar terminales de transporte intermodal en su conjunto y para apoyar decisiones estratégicas y tácticas relativas a su diseño y rediseño. Otras herramientas de simulación flexibles y no flexibles han quedado fuera de esta revisión, por representar de forma parcial una terminal y/o por estudiar problemas de carácter operacional (véanse, por ejemplo, Ramani, 1996; Sgouridis y

Angelides, 2002; Hou et al., 2006; Longo et al., 2006; Bae et al., 2011; Liu y Takakuwa, 2011 y Kemme, 2012).

Modelos de simulación no flexibles

La mayor parte de los modelos de simulación recogidos en la literatura para estudiar terminales ferroviarias de contenedores no son flexibles. Estos modelos se emplean para estudiar terminales encargadas de intercambiar contenedores entre el ferrocarril y otro modo de transporte, trasbordar contenedores entre trenes o formar nuevos trenes salientes a partir de la clasificación de las plataformas transportadas por otros trenes entrantes. La siguiente revisión se estructura según estas tres funciones, con el objetivo de recabar información sobre las infraestructuras, recursos, procesos e indicadores utilizados para evaluar el funcionamiento del sistema considerado como objeto de estudio en esta tesis.

Ferreira y Sigut (1993), Sarosky y Wilcox (1994), Weigel (1994), Ferreira y Sigut (1995), Kozan (2006), García Sánchez et al. (2006) y Lee et al. (2006a) han desarrollado modelos de simulación no flexibles para estudiar terminales ferroviarias particulares destinadas a intercambiar contenedores entre el ferrocarril y otro modo de transporte.

Ferreira y Sigut (1993) presentan un modelo de simulación para estudiar la capacidad que una terminal ferroviaria australiana posee para satisfacer un plan de trenes con dos periodos pico de trabajo. Uno, a primera hora de la mañana, donde el número de trenes a descargar es máximo, y otro, a última hora de la tarde, cerca de la hora de salida de los trenes, donde el número de camiones a descargar aumenta. La terminal simulada es atendida por grúas pórtico, grúas móviles y cargadores frontales, que se encargan de trasbordar contenedores entre trenes y camiones o de almacenarlos temporalmente en el suelo de la terminal hasta su salida. Este modelo de simulación proporciona resultados sobre: la utilización de los equipos, el número de contenedores cargados/descargados y los tiempos medios asociados con las operaciones de carga/descarga.

Sarosky y Wilcox (1994) muestran un modelo de simulación para analizar la consolidación de dos terminales ferroviarias estadounidenses en una nueva. La terminal simulada manipula contenedores y semirremolques cargados con un contenedor. En este último caso, ambos elementos, semirremolque y contenedor, se cargan conjuntamente sobre la plataforma de un tren. Si el trasbordo de carga tren-camión no es directo, los semirremolques cargados con un contenedor esperan en el suelo, mientras que los contenedores sin semirremolque son colocados sobre

plataformas porta contenedores (similares a las indicadas en el subapartado 2.5.1), donde esperan hasta su salida de la terminal. Los equipos simulados son grúas pórtico y cargadores laterales (para cargar/descargar trenes/camiones) y tractores (para mover semirremolques y plataformas porta contenedores por la terminal). El modelo simulación proporciona, entre otros resultados, información sobre: las esperas relativas a la entrada/salida de camiones, el tiempo de carga/descarga de trenes y la utilización de los equipos, las vías y las zonas de aparcamiento para semirremolques y plataformas porta contenedores.

Weigel (1994) programa un modelo de simulación para evaluar la capacidad que una terminal ferroviaria estadounidense presenta para satisfacer un plan de trenes. Al igual que en Sarosky y Wilcox (1994), el modelo desarrollado por Weigel (1994) representa los procesos de llegada, salida, carga y descarga de camiones y trenes, trabaja con contenedores y semirremolques cargados con un contenedor y utiliza grúas pórtico, cargadores y tractores para su manipulación. Los resultados de la simulación hacen referencia a: la utilización de los equipos, el uso de la zona de aparcamiento para semirremolques y plataformas porta contenedores y el grado de cumplimiento del plan de trenes a evaluar (entrada planificada para los trenes vs instante de colocación en las vías, carga real transportada por los trenes salientes vs carga planificada y salida planificada de los trenes vs instante de salida real).

Ferreira y Sigut (1995) crean dos modelos de simulación para evaluar el funcionamiento de dos terminales ferroviarias australianas. Una terminal manipula contenedores y otra trabaja con plataformas bimodales. Según se expuso en el subapartado 2.5.1, las plataformas bimodales están provistas de un bogie desmontable o de un solo eje, de tal forma que pueden ser utilizadas como semirremolque de un camión o como plataforma de un tren. El funcionamiento de la terminal de contenedores es similar al indicado en Ferreira y Sigut (1993). En la otra terminal, se utiliza un tractor para extraer las plataformas bimodales de las vías y para colocarlas en una zona de aparcamiento, donde esperan hasta su salida en camión. El proceso de carga de un tren es el inverso. Los modelos desarrollados son utilizados para comparar ambos sistemas de transporte de contenedores sobre trenes ante varios escenarios, donde, por ejemplo, el número de equipos y el número recursos humanos varían. Las variables de salida empleadas en la comparación hacen referencia, por ejemplo, al tiempo medio de formación de un tren o al número de semirremolques pendientes de ser ensamblados cierto tiempo antes de su salida.

Kozan (2006) desarrolla un modelo de simulación, usando el software comercial Arena, para representar una terminal ferroviaria australiana que intercambia contenedores entre trenes y camiones usando grúas pórtico, grúas móviles y cargadores frontales. Este modelo es utilizado para comparar distintas configuraciones donde el número de grúas pórtico varía entre 1 y 2, el número de grúas móviles varía entre 5 y 9 y el número de cargadores frontales varía entre 4 y 8. El objetivo de este estudio es determinar qué configuración es capaz de proporcionar, ante un plan de trenes semanal dado, mínimos retrasos en la salida de los trenes y mínimos costes por: incumplimiento del plan, "leasing" de los equipos y operación de los equipos.

García Sánchez et al. (2006) usan un modelo de simulación para estudiar la capacidad de un puerto seco español ante distintos escenarios de demanda. Los puertos secos son terminales ferroviarias interiores conectadas con uno o más puertos marítimos. Estas terminales realizan los mismos procesos que otras terminales ferroviarias interiores (entrada, salida, carga y descarga de trenes y camiones), pudiendo, además, prestar servicios de aduana, lo que agiliza la entrega de mercancía desde los puertos marítimos de origen hacia sus puntos de destino y viceversa. En este caso, la terminal simulada trabaja con contenedores de 20 y 40 pies, dispone de grúas móviles y pórtico para su manipulación y tiene dos zonas donde los contenedores son colocados sobre el suelo (una está a unos metros de las vías de carga/descarga y otra justo al lado de éstas). El modelo de simulación, programado usando el software comercial Witness, proporciona información sobre: el tiempo medio de estancia de los contenedores en la terminal, la utilización de sus recursos e infraestructuras y la existencia de problemas para atender la carga/descarga de trenes y camiones.

Lee et al. (2006a) evalúan, usando simulación, distintas alternativas de diseño para dos nuevas terminales ferroviarias encargadas de prestar servicio a varios puertos coreanos. Las terminales simuladas trabajan con contenedores, usan tractores con plataforma para mover contenedores entre sus vías y las terminales portuarias con las que están conectadas, prestan servicios similares a los realizados por otras terminales ferroviarias interiores (entrada, salida, carga y descarga de trenes y vehículos) y disponen de grúas pórtico para atender la carga/descarga de trenes y de tractores con plataforma. En este trabajo, los autores desarrollan un modelo de simulación para analizar el funcionamiento de cada configuración inicial a estudiar. Posteriormente, estos modelos son reprogramados para evaluar el efecto sobre la utilización de las infraestructuras y de los recursos de cada terminal de varios cambios en el número de vías y en el número de grúas existentes.

Otros autores, como Marín Martínez et al. (2004) y Wiegmans et al. (2007), han creado modelos de simulación no flexibles para estudiar el trasbordo de contenedores entre trenes en una terminal ferroviaria particular.

Marín Martínez et al. (2004) usan simulación para evaluar cuatro estrategias de operación para las grúas pórtico que trasbordan contenedores entre trenes en la terminal de Portbou. Esta terminal, que se encuentra situada en la frontera francoespañola, se encarga de trasbordar contenedores desde trenes con ancho internacional a trenes con ancho ibérico, si el destino de la carga es la península ibérica, o desde trenes con ancho ibérico a trenes con ancho internacional, si su destino está fuera de la península. Los autores presentan un modelo de simulación, programado usando el software comercial Witness, para cada estrategia de operación a simular. Cada modelo permite, dado un plan de trenes a trasbordar, obtener información sobre: el tiempo total de trasbordo, las esperas por parte de los trenes y la utilización de las grúas pórtico.

Wiegmans et al. (2007) presentan un modelo de simulación, programado en el software comercial Arena, para estudiar el trasbordo de contenedores entre trenes en una terminal ferroviaria que actúa como "hub" de una red europea. En el "hub" a simular, las llegadas y las salidas de los trenes están sincronizadas, de tal forma que todos los trenes que intercambian carga permanecen simultáneamente en la terminal durante un periodo de tiempo. Durante este periodo, los contenedores transportados por los trenes entrantes son recolocados en su tren de destino usando grúas pórtico. En este trabajo, los resultados del modelo de simulación (tiempo empleado para componer trenes, etc.) son comparados con los de otro modelo, creado para simular la zona de clasificación de una terminal ferroviaria. En esta zona, las plataformas de los trenes entrantes son clasificadas según su próximo destino para formar nuevos trenes salientes.

Al igual que Wiegmans et al. (2007), Cenek (1996), Kavicka y Klima (1999), Marinov y Viegas (2009), Marinov y Viegas (2011) y Lin y Cheng (2011) emplean modelos de simulación no flexibles para estudiar la clasificación de plataformas en una terminal particular.

Cenek (1996) simula gráficamente el movimiento de los trenes y de sus plataformas por las vías de clasificación de una terminal. En este caso, las vías de clasificación están construidas con una joroba, desde donde un tractor de maniobras empuja los lotes de plataformas a clasificar. Una vez hecho esto, las plataformas caen por gravedad en la vía de destino.

Kavicka y Klima (1999) presentan un modelo de simulación para determinar si la terminal ferroviaria de clasificación de Linz Vbf (Austria) es capaz de atender nuevos volúmenes de carga. El modelo de simulación representa la entrada, la descomposición, la formación y la salida de los trenes y proporciona información sobre el uso de sus infraestructuras y recursos dado un plan de trenes.

Marinov y Viegas (2009) y Marinov y Viegas (2011) estudian, usando simulación, la capacidad que las terminales ferroviarias de clasificación de Gaia y Entrocamento poseen para satisfacer un plan de trenes. En ambas terminales portuguesas, las vías de clasificación están construidas sobre un terreno llano y se utilizan tractores de maniobras para clasificar las plataformas de los trenes entrantes según su próximo destino. Los modelos creados en estos trabajos simulan la entrada, la descomposición, la formación y la salida de los trenes y sus resultados hacen referencia, por ejemplo, al número de trenes procesados, al número de trenes que esperan para ser clasificados o al uso de los recursos empleados en la descomposición/formación de trenes.

Lin y Cheng (2011) desarrollan un modelo de simulación para determinar si los recursos y las infraestructuras existentes en una terminal ferroviaria de clasificación norteamericana (tractores de maniobras, vías de clasificación, etc.) pueden satisfacer un plan de trenes dado. Al igual que en Cenek (1996), las vías de clasificación están construidas con una joroba. El modelo de simulación proporciona resultados sobre: el porcentaje de utilización de los recursos y de las infraestructuras de la terminal, la proporción de trenes que sale sin retrasos, el tiempo medio en el que son atendidos los trenes, etc.

Del mismo modo, se han desarrollado múltiples modelos de simulación no flexibles para estudiar decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y al rediseño de puertos marítimos y puertos interiores (véase, por ejemplo, Ballis et al., 1997; Merkurjev et al., 1998; Yun y Choi, 1999; Tahar y Hussain, 2000; Kia et al., 2002; Liu et al., 2002; Shabayek y Yeung, 2002; Vis, 2006; Bugaric y Petrovic, 2007; Cortés et al., 2007; Ambrosino y Tànfani, 2009; Ding, 2010; Vis y van Anholt, 2010; Petering, 2011; Cartenì y de Luca, 2012 y Huang et al., 2012).

A pesar de las diferencias identificadas entre terminales portuarias y terminales ferroviarias interiores en los subapartados 2.4.1 y 3.3.1, en esta revisión, se han estudiado los modelos de simulación publicados sobre puertos, dado que, en ciertos casos, estos sistemas poseen terminales ferroviarias para facilitar la entrada/salida de contenedores. Éste es el caso, por ejemplo, de los puertos marítimos estudiados por Merkurjev et al. (1998), Kia et al. (2002), Liu et

al. (2002) y Ambrosino y Tànfani (2009), donde sus terminales ferroviarias: están lo suficientemente alejadas de los muelles como para no permitir el intercambio directo de contenedores entre trenes y barcos, usan grúas similares a las empleadas por las terminales ferroviarias interiores para cargar/descargar trenes y utilizan vehículos de patio (como, por ejemplo, tractores con plataforma) para mover contenedores entre el subsistema ferroviario y marítimo.

La mayor parte de los modelos de simulación no flexibles encontrados en la literatura han sido programados usando softwares de simulación basada en eventos discretos no diseñados específicamente para simular terminales de transporte intermodal (en adelante, softwares no específicos), como, por ejemplo, Arena, Witness o SIMUL 8. Minoritariamente, se han encontrado otros softwares creados específicamente para simular este tipo de sistemas (en adelante, softwares específicos), véanse, por ejemplo, los recogidos en Klima et al. (2001), Adamko y Marton (2008), Lin y Cheng (2009), Chesscon (2012), FlexSim CT (2012) y Trafalquar (2012).

Al igual que ocurre con los softwares no específicos, los softwares específicos requieren conocimientos de programación para: definir los elementos que componen un modelo de simulación, detallar sus características y establecer las relaciones que existen entre ellos. Sin embargo, la implementación de modelos parece más sencilla si se utilizan softwares específicos, al existir una correspondencia entre los instrumentos de programación implementados en estos softwares (elementos y reglas de programación) y el sistema real a representar.

En la literatura y en varias páginas web consultadas, se han encontrado referencias a softwares específicos para simular terminales ferroviarias encargadas de clasificar plataformas (véase, por ejemplo, Klima et al., 2001; Adamko y Marton, 2008 y Lin y Cheng, 2009) y para simular terminales portuarias de contenedores (véase, por ejemplo, Chesscon, 2012; Flexsim CT, 2012 y Trafalquar, 2012). Sin embargo, no se han encontrado softwares específicos para simular terminales ferroviarias similares a las estudiadas en esta tesis, esto es, terminales capaces de intercambiar contenedores entre el ferrocarril y otro modo de transporte, además de poder combinar esta función con el trasbordo de contenedores entre trenes y/o con la clasificación de plataformas.

Plataformas flexibles de simulación

En la literatura, sólo se han encontrado tres plataformas flexibles de simulación con objetivos similares a la presentada en esta tesis, esto es, estudiar

decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y al rediseño de terminales ferroviarias de contenedores. A continuación, se revisa cada una de ellas, con el propósito de determinar el rango de terminales que son capaces de representar. Según lo expuesto en el apartado 3.3.2 (caracterización del problema de estudio), este rango depende, a su vez, del número de características de diseño (funciones, tipo de recursos y de infraestructuras, otras características de diseño relativas a los recursos y a las infraestructuras y layout) y de operación (reglas de operación, horarios de prestación de servicios y demanda a atender) que un decisor puede configurar, a través de una interfaz de usuario.

La primera plataforma flexible de simulación fue desarrollada para el operador ferroviario estadounidense Burlington Northern Santa Fe y fue presentada en el congreso "Winter Simulation Conference" en 1999 (Kulick y Sawyer, 1999) y en 2001 (Kulick y Sawyer, 2001). La primera versión de esta plataforma flexible dispone de un modelo de simulación, programado usando el software comercial Arena, que representa los principales elementos y procesos de una terminal ferroviaria genérica dedicada al intercambio tren-carretera de contenedores y de semirremolques cargados con un contenedor. Al igual que en Sarosky y Wilcox (1994) y Weigel (1994), si el intercambio de carga entre modos no es directo, los semirremolques esperan en el suelo, mientras que los contenedores sin semirremolque son colocados sobre una plataforma porta contenedores, donde esperan hasta su salida de la terminal. Los equipos simulados son grúas pórtico (para cargar/descargar trenes y camiones) y tractores (para mover semirremolques y plataformas porta contenedores por la terminal). El modelo de simulación puede ser configurado, introduciendo ciertas características de la terminal a simular en una base de datos: características relativas al diseño de sus recursos e infraestructuras (número de vías, número de equipos, capacidad de aparcamiento para semirremolques/plataformas porta contenedores, etc.), layout, horarios de trabajo y planes de trenes. Otras características como, las funciones de la terminal a simular, el tipo de recursos y de infraestructuras existentes y las reglas de operación, permanecen fijas a lo largo de la simulación. La segunda versión de la plataforma flexible difiere de la primera, principalmente, en la interfaz de usuario utilizada para configurar el modelo de simulación. En este segundo caso, la interfaz es una hoja de cálculo implementada en Microsoft Excel. Los autores mencionan haber utilizado esta segunda versión de la plataforma flexible para evaluar la capacidad que posee una terminal ferroviaria estadounidense para satisfacer un plan de trenes. No se han encontrado publicaciones posteriores donde se profundice en la flexibilidad de esta plataforma, se proporcionen más detalles sobre los

procesos simulados o se muestren resultados numéricos sobre el estudio de capacidad mencionado en Kulick y Sawyer (2001).

Gambardella et al. (2002) y Rizzoli et al. (2002) muestran otra plataforma flexible de simulación desarrollada para estudiar terminales ferroviarias de contenedores. Esta plataforma flexible, que fue creada en el marco del proyecto "PLATFORM", financiado por el IV Programa Marco de la Dirección General VII de la Comisión Europea, aparece descrita con más detalle que la presentada en Kulick y Sawyer (1999) y en Kulick y Sawyer (2001).

La plataforma flexible presentada por Gambardella et al. (2002) y Rizzoli et al. (2002) dispone de un modelo para simular terminales que intercambian contenedores entre trenes y camiones usando grúas pórtico y cargadores frontales. Este modelo, programado en MODSIM III (un lenguaje de simulación orientado a objetos), representa los principales elementos de una terminal: puertas de entrada/salida de camiones, vías de entrada/salida de trenes, vías de carga/descarga, grúas, etc. Al igual que en García Sánchez et al. (2006), las terminales a simular disponen de dos zonas donde los contenedores son almacenados sobre el suelo (una está situada justo al lado de las vías de carga/descarga y otra está emplazada a unos metros de éstas). El usuario de esta segunda plataforma flexible puede configurar el modelo de simulación, introduciendo ciertas características de la terminal a simular en una base de datos: características relativas al diseño de sus recursos e infraestructuras (número de puertas de entrada/salida de camiones, número de vías, número de grúas, capacidad de las zonas de almacenamiento, tiempos de operación, etc.), layout, horarios de trabajo, planes de trenes y patrón de llegadas para los camiones. Otras características, quizás no tan fáciles de dejar de forma parametrizable en un modelo de simulación, como las funciones de la terminal a simular, el tipo de recursos y de infraestructuras existentes o las reglas de operación, también permanecen fijas en esta segunda plataforma de simulación. Las variables de salida proporcionadas por la plataforma flexible son similares a las indicadas anteriormente para los modelos de simulación no flexibles: tiempo de estancia de los contenedores en la terminal, uso de recursos e infraestructuras, etc. En Rizzoli et al. (2002), aparece un caso práctico donde la plataforma flexible es utilizada para representar una terminal ferroviaria italiana, con el objetivo de estudiar cómo influye del tiempo de trabajo de sus puertas de entrada/salida sobre el tiempo medio que esperan los camiones fuera de la terminal.

La tercera plataforma flexible de simulación fue presentada en los congresos "GI Jahrestagung" en 2007 (Gronalt et al., 2007) y "Winter Simulation Conference" en 2008 (Benna y Gronalt, 2008). Esta plataforma está compuesta por dos elementos: un modelo de simulación (encargado de representar el funcionamiento de una terminal ferroviaria austríaca genérica que utiliza grúas móviles y pórtico para intercambiar contenedores entre trenes y camiones) y una interfaz de usuario (que permite configurar el modelo de simulación según las características particulares de la terminal a simular). El rango de terminales a simular con esta tercera plataforma flexible es similar al representado por Gambardella et al. (2002) y Rizzoli et al. (2002), aunque la plataforma flexible presentada por Benna y Gronalt (2008) permite configurar alguna característica más relativa al diseño de los recursos y las infraestructuras existentes en las terminales a simular (por ejemplo, capacidad de la zona de aparcamiento para camiones y distancias a recorrer por los camiones y las grúas). No se han encontrado casos prácticos de aplicación para esta última plataforma flexible ni publicaciones posteriores donde se proporcionen más detalles sobre este trabajo.

El resto de trabajos encontrados en la literatura sobre plataformas flexibles de simulación relativas a terminales ferroviarias de contenedores son resultado de esta tesis (véase García y García, 2009; García y García, 2012 y García-Hernández y García-Gutiérrez, 2012). Estos trabajos se estudiarán con más detalle a lo largo del apartado 6.4.

A pesar de las diferencias existentes entre terminales ferroviarias y portuarias, se ha revisado la literatura publicada en este último campo para determinar si existen plataformas flexibles de simulación encargadas de analizar decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y al rediseño de puertos. Tras esta revisión, se han encontrado tres nuevas plataformas flexibles, que permiten representar y estudiar diversas terminales dedicadas al intercambio de contenedores entre barcos y camiones.

Las plataformas flexibles creadas por Ballis y Abacoumkin (1996) y Huang et al. (2008) son parecidas a la desarrollada en esta tesis, al disponer de un modelo de simulación preprogramado que se configura a partir de una interfaz de usuario.

Ballis y Abacoumkin (1996) presentan un modelo que simula el funcionamiento de un puerto al completo, aunque la carga/descarga de camiones y sus movimientos por la terminal están representados con mayor nivel de detalle que el resto de procesos. El usuario de este modelo puede configurarlo, introduciendo, a partir de un módulo de entrada de datos, ciertas características

relativas a la terminal a estudiar: características de diseño para los recursos y las infraestructuras presentes en su patio (número de equipos, productividad, velocidad, etc.), layout y patrón de llegadas para los camiones. Esta plataforma flexible de simulación es utilizada, al final de artículo, para analizar el nivel de servicio proporcionado a los camiones en la terminal portuaria de Pireaus (Grecia).

La plataforma presentada por Huang et al. (2008) permite configurar nuevas características relativas a la demanda y al diseño de los recursos e infraestructuras de una terminal portuaria (tráfico de barcos, número de grúas encargadas de cargar/descargar barcos, etc.). Sin embargo, al igual que Ballis y Abacoumkin (1996), Huang et al. (2008) no indican explícitamente si su plataforma puede configurar otros aspectos básicos de diseño y de operación que difieren de unas terminales a otras, como, por ejemplo, el número de muelles, la longitud de los muelles o los turnos de trabajo de las grúas. Esta segunda plataforma flexible es utilizada para analizar la capacidad de tres terminales portuarias en la región de Singapur.

Por último, Nguyen et al. (2006) aplican un enfoque alternativo al presentado por Ballis y Abacoumkin (1996) y Huang et al. (2008) para generar, de forma automática, modelos de simulación relativos a terminales portuarias de contenedores. Esta tercera plataforma está compuesta por una interfaz de usuario, un generador de modelos y unas librerías de objetos que emulan los principales elementos de un puerto (zonas de almacenamiento de contenedores, muelles de carga/descarga de barcos, etc.). Para construir un modelo, el decisor debe introducir, en una interfaz de usuario, ciertas características relativas al diseño de los recursos y de las infraestructuras existentes en la terminal a simular (número de zonas de almacenamiento, dimensiones de cada zona, etc.). Estas características son almacenadas en una base de datos según se va completando la interfaz. Después, el generador crea el modelo de simulación a partir de los objetos preprogramados en las librerías y las especificaciones almacenadas en la base de datos. Al igual que Ballis y Abacoumkin (1996) y Huang et al. (2008), Nguyen et al. (2006) no indican explícitamente si su plataforma flexible puede ser utilizada para configurar otros aspectos básicos de la terminal a simular (como, por ejemplo, la demanda o los turnos de trabajo de los equipos) u otras características relativas a su diseño y operación (como, por ejemplo, las funciones de la terminal, el tipo de recursos y de infraestructuras existentes o las reglas de operación). En este caso, no se han encontrado ejemplos prácticos sobre la aplicación de esta última plataforma flexible de simulación.

4.2.2. CONCLUSIONES SOBRE EL SISTEMA DE ESTUDIO

Respecto al primer objetivo de la revisión bibliográfica, esto es, recabar información sobre el sistema de estudio, se han obtenido conclusiones sobre: la localización de las terminales ferroviarias de contenedores dentro de una red, las funciones que desarrollan, los subsistemas que las componen, los sistemas que emplean para cargar contenedores sobre trenes, los procesos que realizan, los recursos y las infraestructuras que emplean para su desarrollo, el tipo de demanda a la que están sometidas y los indicadores utilizados para evaluar su funcionamiento.

Las terminales ferroviarias de contenedores pueden estar presentes en el interior de una red o dentro de un puerto marítimo o fluvial. Las terminales ferroviarias, encontradas en la literatura, que encajan dentro de este último grupo están lo suficientemente alejadas de los muelles como para no permitir el intercambio directo de contenedores entre trenes y barcos, además de usar recursos e infraestructuras similares a los empleados por las terminales ferroviarias interiores para intercambiar contenedores entre modos de transporte. La principal diferencia que existe entre ambos tipos de terminales ferroviarias radica en que las terminales interiores reciben contenedores a través de camiones, mientras que las terminales integradas en puertos pueden emplear también vehículos de patio (como, por ejemplo, tractores con plataforma) para mover contenedores entre los subsistemas marítimo/fluvial y ferroviario.

Además de intercambiar contenedores entre trenes y camiones o entre trenes y tractores con plataforma, una terminal ferroviaria de contenedores puede trasbordar contenedores entre trenes y/o formar nuevos trenes salientes a partir de la clasificación de las plataformas transportadas por otros trenes entrantes. Otras funciones, como las estudiadas por Marín Martínez et al. (2004) (trasbordo de contenedores entre trenes que circulan entre dos países con diferente ancho de vía) o por García Sánchez et al. (2006) (prestación de servicios de aduana), han sido menos estudiadas en la literatura revisada.

Los recursos y las infraestructuras empleados para intercambiar contenedores entre modos y para trasbordar contenedores entre trenes son similares, pero diferentes de los empleados para clasificar plataformas. De ahí que los elementos de una terminal ferroviaria puedan clasificarse en dos subsistemas o zonas: una zona de carga/descarga (donde se almacenan contenedores, se intercambian contenedores entre modos y/o se trasbordan contenedores entre

trenes) y una zona de clasificación (donde se clasifican las plataformas transportadas por los trenes entrantes para formar nuevos trenes salientes).

Las zonas de carga/descarga estudiadas en la literatura trabajan únicamente con contenedores (no con cajas móviles) y el sistema empleado para transportar contenedores sobre trenes condiciona los recursos y las infraestructuras presentes en estas zonas, además de su forma de operar.

La mayor parte de las zonas de carga/descarga estudiadas en la literatura cargan contenedores directamente sobre las plataformas de un tren. En este caso, si el movimiento de contenedores entre modos no es directo, existen dos alternativas para almacenarlos. En la primera, los contenedores esperan en el suelo, pudiendo existir dos zonas para su almacenamiento: una justo al lado de las vías de carga/descarga y otra a unos metros de éstas. En ambas zonas de almacenamiento, los contenedores pueden ser apilados (Kozan, 2000). En la segunda alternativa, cada contenedor descargado de un tren o de un camión es colocado sobre una plataforma porta contenedores, donde espera hasta su salida de la zona de carga/descarga. Este último sistema de almacenamiento permite aumentar la productividad de los equipos que trabajan en la zona de carga/descarga y el nivel de servicio proporcionado a los camiones, al reducir el número de dobles manipulaciones (Ferreira y Sigut, 1993). Sin embargo, su principal inconveniente radica en la fuerte inversión en plataformas porta contenedores y en espacio dedicado a su almacenamiento que debe acometerse para ponerlo en marcha (Ferreira y Sigut, 1993). Ferreira y Sigut (1993), Ferreira y Sigut (1995), Kozan (1997b) y Kozan (2000) coinciden en que ambas configuraciones de zona de carga/descarga tienen un patrón geográfico. La primera es comúnmente utilizada en Europa, Australia y Asia, mientras que la segunda es frecuentemente utilizada en Norte América.

Las grúas pórtico, las grúas móviles y los cargadores son los equipos más empleados, en estas zonas de carga/descarga, para manipular contenedores. En las terminales estudiadas, las grúas pórtico se ocupan principalmente de cargar/descargar trenes y camiones, mientras que las grúas móviles y los cargadores se encargan de darles apoyo. Las zonas de carga/descarga que almacenan contenedores en el suelo suelen utilizar grúas móviles y/o cargadores para cargar/descargar camiones y para colocar/extraer contenedores en/de las zonas de almacenamiento. Según lo indicado en el subapartado 2.5.2, a diferencia de las grúas móviles y pórtico, los cargadores sólo pueden apilar contenedores en una fila. Esto implica diseñar zonas de almacenamiento menos eficientes en

términos de espacio utilizado, al tener que crear pasillos entre filas de contenedores para que los cargadores puedan moverse. Las zonas de carga/descarga que almacenan contenedores sobre plataformas porta contenedores usan grúas móviles y/o cargadores para cargar/descargar camiones y tractores para mover las plataformas porta contenedores por la zona de carga/descarga. También se han identificado otras zonas de carga/descarga, como las estudiadas por Lee et al (2006), donde las grúas pórtico son el único recurso disponible para intercambiar contenedores entre modos.

El uso de semirremolques como sistema para transportar contenedores sobre trenes ha sido menos estudiado en la literatura revisada. La revisión bibliográfica ha permitido identificar ciertas zonas de carga/descarga norteamericanas que manipulan contenedores y semirremolques cargados con un contenedor (véase, por ejemplo, las zonas de carga/descarga simuladas por Sarosky y Wilcox, 1994 y Weigel, 1994). En este caso, ambos elementos, semirremolque y contenedor, se cargan conjuntamente sobre la plataforma de un tren y si su trasbordo entre modos no es directo, se colocan en el suelo, donde esperan hasta su salida de la zona de carga/descarga. Los recursos y las infraestructuras de estas zonas son similares a los expuestos anteriormente para los nodos que manipulan sólo contenedores y que los almacenan sobre plataformas porta contenedores.

Los modelos empleados para estudiar zonas de carga/descarga donde se trabaja con plataformas bimodales (esto es, plataformas que pueden ser utilizadas como semirremolque de un camión o como plataforma de un tren) son escasos en la literatura revisada. Este sistema de transporte requiere de tractores para extraer, de las vías, las plataformas de un tren entrante y para colocarlas en una zona de aparcamiento, donde esperan hasta su salida en camión. El proceso de carga de un tren es el inverso. Ferreira y Sigut (1995) indican que la carga/descarga de trenes donde los contenedores son cargados directamente sobre plataformas no bimodales es menos compleja e intensiva en tiempo que la carga/descarga de trenes formados por plataformas bimodales. Por contra, los costes, en términos de patio y de equipos, son significativamente menores si se utilizan plataformas bimodales. Según Ferreira y Sigut (1995), en 1990, el uso de este sistema estaba en fase de pruebas en Australia y, en 1991, había 14 terminales que trabajaban con plataformas bimodales en Estados Unidos.

Ninguno de los modelos de simulación encontrados en la literatura ha considerado el uso de camiones completos como sistema para transportar contenedores sobre trenes.

Janic et al. (1999) y Ballis y Golias (2004) identifican que si la demanda es alta, varios envíos con un mismo origen y destino pueden ser agrupados para formar un tren que realiza un recorrido directo entre las zonas de carga/descarga de dos terminales. Sin embargo, cuando la demanda no es suficiente para formar un tren directo, los envíos suelen transportarse hacia su destino final a través de una secuencia de trenes. Generalmente, los envíos con diferentes destinos finales, pero que comparten una parte de un trayecto, se agrupan en un mismo tren. Posteriormente, la carga de estos trenes se vuelve a ordenar según su próximo destino en una terminal intermedia que actúa como "hub".

Según la literatura revisada (véase, por ejemplo, Macharis y Bontekoning, 2004), existen dos alternativas para ordenar la carga transportada por un tren entrante según su próximo destino. En la primera, que tiene lugar en la zona de carga/descarga, los contenedores transportados por los trenes entrantes son recolocados en los trenes salientes usando grúas pórtico, mientras que, en la segunda, que tiene lugar en la zona de clasificación, se forman nuevos trenes salientes a partir de las plataformas transportadas por otros trenes entrantes. Según Rotter (2004), la primera alternativa es más eficiente cuando las llegadas y las salidas de los trenes están sincronizadas, de tal forma que todos los trenes permanecen, en la zona de carga/descarga, durante un mismo periodo de tiempo, durante el cual se produce el trasbordo de contenedores entre trenes sin necesidad de realizar almacenamientos intermedios. Rotter (2004) también indica que la clasificación de plataformas es menos eficiente en tiempo y en coste que el trasbordo de contenedores entre trenes, además de necesitar que todas las unidades de carga colocadas sobre una misma plataforma de un tren tengan el mismo destino final.

A pesar de las desventajas identificadas anteriormente, en la literatura, se han encontrado más modelos de simulación para estudiar terminales dedicadas a clasificar plataformas que para estudiar terminales dedicadas a trasbordar contenedores entre trenes. En esta línea, Marinov y Viegas (2009) y Marinov y Viegas (2011) identifican tres tipos de zonas de clasificación. En el primero, las vías de clasificación están construidas con una joroba, desde donde un tractor de maniobras empuja los lotes de plataformas a clasificar. Una vez hecho esto, las plataformas caen por gravedad en la vía de destino. En el segundo, toda la zona de

clasificación está construida con una pendiente continua de caída, para reducir la utilización de los tractores de maniobras. En el tercero, todas las vías de clasificación están construidas sobre un terreno plano y un tractor de maniobras es utilizado para clasificar las plataformas de los trenes entrantes según su próximo destino. En esta última configuración, el uso de los tractores de maniobras es mayor que en los otros dos casos. Wiegman et al. (2007) indican que, en Europa, existen algunas zonas de clasificación con joroba, aunque su número es reducido; Marinov y Viegas (2009) y Marinov y Viegas (2011) señalan que, en Portugal, todas las zonas de clasificación están construidas sobre un terreno llano; y Lin y Cheng (2009) establecen que, en Estados Unidos, las zonas de clasificación construidas sobre un terreno llano son las más comunes, aunque las zonas de clasificación con joroba son más eficientes.

Todas las terminales ferroviarias estudiadas a lo largo del subapartado 4.2.1 trabajan contra un plan, que determina el día y la hora de entrada/salida de los trenes en/de la terminal. En los trabajos presentados por Ferreira y Sigut (1993) y Ballis y Golias (2002), las entradas de trenes se concentran a primera hora de la mañana y las salidas a última hora de la tarde, debido, como se comentó en el subapartado 2.4.2, a que la circulación de los trenes de mercancías por la red se realiza preferentemente por la noche para evitar interferencias con el transporte de pasajeros. La llegada de los camiones está vinculada, entre otros aspectos, con: el horario de trabajo de la terminal, la entrada/salida de los trenes y las preferencias del mercado. Generalmente, este último aspecto impide a los gestores de la terminal conocer el instante exacto de su llegada (Ballis y Golias, 2002).

Sarosky y Wilcox (1994) indican que una terminal ferroviaria debe ser capaz de atender períodos pico de demanda sin descuidar el nivel de servicio proporcionado a sus clientes, sin generar cuellos de botella y sin presentar un alto índice de capacidad ociosa relativo a sus recursos e infraestructuras.

Gran parte de los trabajos estudiados en el subapartado 4.2.1 coinciden en que el cumplimiento del plan de trenes es el principal indicador para determinar si una terminal está funcionando correctamente. Por el contrario, sólo dos trabajos presentan criterios para determinar si el nivel de servicio proporcionado a los camiones es aceptable. Éste es el caso de Ballis et al. (1997), que consideran que una terminal funciona correctamente si, al menos, el 95% de los camiones son atendidos en un tiempo máximo de 30 minutos; o de Ballis y Golias (2002), donde se considera que una terminal funciona correctamente si el tiempo de servicio es, como máximo, 20 minutos para el 95% de los camiones atendidos. Otros aspectos,

como la longitud de las colas de espera o la saturación de los recursos y de las infraestructuras, también suelen ser estudiados para evaluar el funcionamiento de una terminal (véase, por ejemplo, Sarosky y Wilcox, 1994; Kozan, 1997b y Benna y Gronalt, 2008).

4.2.3. CONCLUSIONES SOBRE LA ORIGINALIDAD Y EL INTERÉS DE LA PLATAFORMA FLEXIBLE DESARROLLADA

La mayor parte de los modelos de simulación encontrados en la literatura no son flexibles. Estos modelos representan y estudian una terminal particular, siendo necesario modificar su programación inicial para simular un nuevo escenario de mejora o una nueva terminal.

En la literatura revisada, sólo se han encontrado tres plataformas flexibles de simulación con un objetivo similar al de esta tesis, esto es, estudiar decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y al rediseño de terminales ferroviarias de contenedores. Estas plataformas flexibles permiten simular terminales dedicadas al intercambio de contenedores entre trenes y camiones, donde ciertas características relativas al diseño de sus recursos e infraestructuras, layout, horarios para la prestación de servicios y demanda pueden variar, mientras que otros aspectos, como sus funciones, el tipo de recursos y de infraestructuras existentes y sus reglas de operación, permanecen fijos.

También se han encontrado otras tres plataformas flexibles para estudiar terminales portuarias encargadas de intercambiar contenedores entre barcos y camiones. Según los detalles proporcionados por sus autores, estas plataformas parecen ser menos flexibles en diseño y en operación que las desarrolladas para simular terminales ferroviarias.

En comparación con estos trabajos previos, la plataforma flexible de simulación desarrollada en esta tesis pretende avanzar en tres aspectos.

En primer lugar, se pretende aumentar el nivel de detalle con el que aparecen representados los procesos de las terminales ferroviarias de contenedores a simular. Por ejemplo, se pretende detallar cómo se colocan los contenedores en las zonas de almacenamiento, así como las inspecciones que se realizan sobre los trenes antes de su descarga o antes de su salida de la terminal. Al simular estos procesos con mayor detalle, se obtendrán resultados más precisos (por ejemplo, en relación al uso de las zonas de almacenamiento de contenedores o de las vías carga/descarga) que los proporcionados por otras plataformas flexibles de

simulación encontradas en la literatura. El detalle de los procesos simulados en esta tesis se recoge en el capítulo 5.

En segundo lugar, se pretende incrementar la flexibilidad de la plataforma desarrollada en esta tesis, con el objetivo de representar una mayor variedad de terminales ferroviarias de contenedores. En esta línea, se pretende construir una plataforma flexible capaz de configurar nuevos aspectos relativos a las características de diseño de los recursos y de las infraestructuras existentes en el sistema a simular, así como nuevas características relativas a su layout, horarios para la prestación de servicios y demanda a atender. Por ejemplo, el número máximo de camiones que pueden esperar, de forma simultánea, cerca de las vías de carga/descarga hasta ser atendidos o los horarios para inspeccionar la carga transportada por los trenes serán definidos de forma parametrizable en la plataforma flexible de esta tesis. Además, esta plataforma flexible será capaz de configurar otros aspectos clave que permanecen fijos en otras plataformas encontradas en la literatura. Por ejemplo, la plataforma flexible presentada en esta tesis será capaz de:

- Representar sistemas donde se realicen una o varias de las siguientes funciones: intercambio de contenedores entre trenes y camiones, intercambio de contenedores entre trenes y tractores con plataforma, trasbordo de contenedores entre trenes y clasificación de plataformas.
- Modelar terminales con diferentes tipos de recursos: grúas pórtico y grúas móviles (u otros recursos asimilables que puedan moverse por la terminal), sólo grúas pórtico o sólo grúas móviles.
- Modelar terminales con diferentes tipos de infraestructuras: zonas de almacenamiento, haces de vías de carga/descarga, etc.
- Representar diferentes reglas de operación, por ejemplo, para almacenar contenedores o para cargar trenes.

A lo largo del capítulo 5, se recoge una descripción más detallada de las características que pueden ser configuradas con la plataforma flexible de simulación presentada en esta tesis.

Por último, al haber aumentado el nivel de detalle de los procesos representados y el número de características a configurar, se pretende que la plataforma flexible de simulación desarrollada sea capaz de proporcionar información sobre terminales y sobre decisiones estratégicas y tácticas no

estudiadas previamente en la literatura. Por ejemplo, esta plataforma flexible podrá ser utilizada para estudiar la capacidad que posee una terminal para manipular trenes cuya longitud supera la de las vías de carga/descarga o para analizar distintas estrategias para actuar como “hub” (trasbordo de contenedores entre trenes, clasificación de plataformas o un uso combinado de ambas funciones). Ejemplos de estos escenarios de estudio aparecen recogidos en el capítulo 8.

4.3. ENTREVISTAS CON EXPERTOS ESPAÑOLES EN TRANSPORTE FERROVIARIO DE CONTENEDORES Y VISITAS A TERMINALES ESPAÑOLAS

A lo largo del desarrollo de esta tesis, se han mantenido varias entrevistas con dos agentes del sector ferroviario español identificados previamente en el apartado 2.3. Por un lado, se han mantenido entrevistas con distintos expertos de la Dirección de Servicios Logísticos de ADIF (empresa pública española encargada de administrar las infraestructuras ferroviarias) y por otro lado, se han mantenido entrevistas con diversos expertos en transporte intermodal de RENFE Operadora (principal operador ferroviario español). Ambos bloques de entrevistas se han realizado con el objetivo de obtener información más precisa y detallada, que la recogida en los apartados 2.4, 2.5 y 4.2, sobre el sistema de estudio.

Adicionalmente, se ha recabado información específica sobre tres terminales ferroviarias de contenedores españolas, mediante visitas a sus instalaciones. Como uno de los objetivos de este capítulo es identificar diferentes tipos de terminales ferroviarias de contenedores, estas tres terminales han sido seleccionadas con el fin de maximizar el número de diferencias que existen entre ellas en términos de: funciones, recursos, infraestructuras y volumen de carga a manipular.

Los resultados de este estudio de campo han permitido identificar que la localización de las terminales ferroviarias de contenedores españolas, las funciones que desarrollan y los subsistemas que las componen son consistentes con las conclusiones que se derivan de la revisión bibliográfica. Estos resultados también son coherentes con la información publicada en distintas páginas webs, relacionadas con el transporte ferroviario de contenedores en España, que aparecen citadas a lo largo del presente apartado.

A partir de las entrevistas con expertos, se ha identificado que, en el caso español, existen terminales interiores, como León Mercancías o Madrid Abroñigal, y terminales ferroviarias situadas dentro de puertos marítimos, como las existentes

en los puertos de Barcelona o de Valencia. RENFE Operadora trabaja como operador ferroviario en estas dos últimas terminales (Vía Libre, 2009; RENFE Operadora, 2012b), donde las vías de carga/descarga están lejos de los muelles y donde se usan equipos similares a los identificados en la literatura (grúas móviles y pórtico) para intercambiar contenedores entre trenes y tractores con plataforma (Puertos del Estado, 2012).

Las terminales interiores españolas suelen disponer de una zona de carga/descarga, donde: se intercambian contenedores entre trenes y camiones; se apilan contenedores en el suelo, si su movimiento entre modos no es directo; y/o se intercambian contenedores entre trenes, si la terminal actúa como “hub” y existen grúas pórtico. Esta zona de carga/descarga puede estar conectada con una zona de clasificación. En España, todas las zonas de clasificación están construidas sobre un terreno llano y pueden ser utilizadas para clasificar plataformas, almacenar plataformas, retirar las locomotoras de los trenes entrantes, colocar las locomotoras a los trenes salientes y/o romper trenes largos que no pueden ser manipulados en la zona de carga/descarga de una terminal. Estas zonas de clasificación son atendidas por tractores de maniobras, que también pueden ser utilizados para mover plataformas entre las zonas de carga/descarga y de clasificación y entre las vías electrificadas y no electrificadas que componen la zona de carga/descarga.

Otras funciones, como el trasbordo de contenedores entre trenes que circulan entre dos países con diferente ancho de vía, son menos frecuentes en la red española. En este caso, sólo dos de las terminales ferroviarias de contenedores de ADIF (Irún Mercancías y Portbou Mercancías) realizan esta función en la frontera franco-española (ADIF, 2012b).

A su vez, las entrevistas con expertos y las visitas a terminales reales han permitido clasificar las terminales interiores españolas en dos grupos según el tipo de recursos empleados en su zona de carga/descarga. El primer grupo, similar al analizado en la literatura, presenta grúas móviles y pórtico; mientras que el segundo, no estudiado en la literatura, presenta sólo grúas móviles.

La elección de un tipo de grúa u otro condiciona, entre otros aspectos, las infraestructuras y el volumen de trabajo que una terminal puede atender. A partir de los resultados del estudio de campo y de la información publicada en la web de ADIF (ADIF, 2012c), se ha identificado que las zonas de carga/descarga operadas por grúas móviles y pórtico suelen presentar un haz con varias vías de carga/descarga, una zona de almacenamiento de contenedores y un área de

carga/descarga de camiones bajo pórtico, así como una zona de almacenamiento y un área de carga/descarga de camiones situadas a unos metros de las vías de carga/descarga. Según los gestores de las terminales estudiadas, las grúas pórtico gestionan las infraestructuras que están bajo pórtico; mientras que las grúas móviles se utilizan para cargar/descargar camiones, para gestionar la zona de almacenamiento que está a unos metros de las vías y para mover contenedores entre las distintas zonas que componen la terminal, siendo poco frecuente que estas grúas se encarguen de cargar/descargar trenes, al no poder atravesar la zona de almacenamiento de contenedores que está bajo pórtico para acceder a las vías laterales de un haz ni poder atravesar estas vías laterales, ocupadas por trenes, para acceder a las vías centrales. Las zonas de carga/descarga operadas sólo por grúas móviles suelen presentar una o dos vías de carga/descarga, una zona de almacenamiento situada a unos metros de las vías de carga/descarga y dos zonas de carga/descarga de camiones (una junto a las vías y otra junto a la zona de almacenamiento). En este caso, las grúas móviles se encargan de cargar/descargar trenes y camiones, de gestionar la zona de almacenamiento y de mover contenedores entre las distintas zonas que componen la terminal. Generalmente, las zonas de carga/descarga que presentan grúas móviles y pórtico son capaces de atender más trenes y camiones que las zonas que sólo trabajan con grúas móviles, al disponer de un mayor número de vías de carga/descarga.

Las fuentes de información analizadas en este apartado también han permitido identificar varias configuraciones, no explicitadas en la revisión bibliográfica, donde las infraestructuras de las zonas de carga/descarga atendidas por grúas móviles y pórtico varían. Por un lado, los resultados del estudio de campo y de la información publicada en la web de ADIF (ADIF, 2012c) han desvelado la existencia de terminales españolas con varios haces de vías de carga/descarga, unos atendidos por grúas móviles y pórtico y otros atendidos sólo por grúas móviles. Por otro lado, se han encontrado terminales donde la zona de almacenamiento que está bajo pórtico difiere en términos de existencia y de ubicación. Por ejemplo, según la información publicada en la web de ADIF (ADIF, 2012c), se observa que Silla Mercancías no dispone de ninguna zona de almacenamiento bajo pórtico, Bilbao Mercancías posee una zona de almacenamiento compuesta por dos filas de contenedores (una a cada lado del haz de vías de carga/descarga), mientras que Madrid Abroñigal presenta dos filas de contenedores a un único lado de las vías de carga/descarga.

Las entrevistas con expertos y las visitas a terminales han sido esenciales para determinar las reglas de operación que emplean las terminales ferroviarias de

contenedores, ya que la revisión bibliográfica sólo ha permitido identificar ciertos aspectos relativos a sus principales procesos: llegada/salida de camiones/tractores con plataforma, carga/descarga de camiones/tractores con plataforma, llegada/salida de trenes, carga/descarga de trenes, almacenamiento de contenedores, trasbordo de contenedores entre trenes y clasificación de plataformas. Las reglas de operación comprenden, por ejemplo, las estrategias empleadas para almacenar contenedores o para asignar grúas a tareas. Estas reglas pueden diferir de unas terminales a otras. Por ejemplo, de acuerdo con la información proporcionada por los gestores de las terminales visitadas, pueden emplearse dos estrategias para almacenar contenedores lejos de las vías de carga/descarga. En este caso, los contenedores pueden almacenarse en superficie o en altura según las necesidades o preferencias de cada terminal. En el capítulo 5, se recogen más detalles sobre las reglas de operación observadas en las terminales españolas visitadas.

Del mismo modo, las entrevistas con expertos y las visitas a terminales han permitido identificar nuevos datos sobre las unidades de carga, las plataformas, los trenes y los camiones manipulados por las terminales ferroviarias de contenedores españolas. Estos datos son coherentes con la información publicada en distintas páginas web, que se indican a lo largo de los párrafos siguientes.

Según expertos de RENFE Operadora y de ADIF, la unidad de carga más utilizada en España es el contenedor (no la caja móvil). RENFE Operadora se encarga de transportar contenedores de 20, 30, 40 y 45 pies (RENFE Operadora, 2012a), de tal forma que las terminales españolas generalmente trabajan con diferentes tamaños de contenedores. Los tamaños más comunes para las terminales ferroviarias que están dentro de un puerto son los de 20 y 40 pies (Ministerio de Fomento, 2011). En las terminales interiores, las unidades de carga más frecuentes son los contenedores de 20, 30 y 40 pies, aunque también pueden existir cajas móviles o contenedores de 45 pies en menor proporción. Estas unidades de carga son transportadas directamente sobre las plataformas de los trenes. RENFE Operadora trabaja con distintos tamaños de plataformas (RENFE Operadora, 2012c), siendo frecuente el uso de plataformas de 60 pies, por su versatilidad para transportar y combinar distintos tamaños de contenedores.

Según lo expuesto en el subapartado 2.4.1, RENFE Operadora oferta dos tipos de trenes para mover unidades de transporte intermodal (RENFE Operadora, 2012b): trenes que se adaptan en recorrido, horario y composición a las necesidades de un único cliente (trenes cliente) y trenes que realizan un servicio

regular entre dos terminales y que pueden transportar unidades de carga de varios clientes (trenes multicliente). La página web de RENFE Operadora recoge información sobre: las terminales que componen la red multicliente, las conexiones que existen entre ellas y la frecuencia semanal de estas conexiones (RENFE Operadora, 2012d). Los trenes cliente y los trenes multicliente de RENFE Operadora realizan recorridos de ida y vuelta entre dos terminales transportando un número constante de plataformas (RENFE Operadora, 2012a). El movimiento de trenes se realiza aunque sus plataformas estén infrautilizadas o, incluso, vacías. Esta estrategia de operación permite equilibrar el número de plataformas que presenta cada nodo de la red ferroviaria española. La longitud de estos trenes suele fluctuar entre 400 y 450 metros, aunque también pueden existir trenes con longitudes inferiores y superiores (ADIF, 2012a). Éste es el caso, por ejemplo, de los trenes de 600 metros que RENFE Operadora comenzó poner en circulación entre Madrid y Valencia a finales de 2008 (Vía Libre, 2008; Vía Libre, 2009).

Las llegadas/salidas de los trenes cliente/multicliente a/de las terminales están planificadas. Para evitar interferencias con los trenes de pasajeros, los trenes de contenedores suelen salir de la terminal de origen por la tarde/noche, llegando a la terminal de destino a primera hora del día siguiente. Al igual que se expuso en las conclusiones de la revisión bibliográfica, el cumplimiento de la hora de salida de los trenes, por parte de las terminales, es un factor muy importante, ya que una desviación en este parámetro puede llevar a replanificar los horarios y las rutas de ciertos trenes que circulan por la red ferroviaria. Para evitar retrasos, la carga de los trenes de RENFE Operadora se cierra cierto tiempo antes de su salida, dejando sin cargar los contenedores que lleguen a la terminal después de este cierre. Al contratar un servicio de transporte, los clientes de RENFE Operadora saben la antelación mínima respecto a su salida en tren con la que deben llevar los contenedores a la terminal de origen para ser cargados. Esta antelación aparece publicada en la página web de RENFE Operadora (RENFE Operadora, 2012d).

Por el contrario, los camiones no suelen llegar a las terminales de ADIF siguiendo un patrón fijo. Sin embargo, los gestores de los nodos estudiados coinciden en que los camiones encargados de retirar un contenedor de la terminal (camiones a cargar) no suelen llegar antes de que haya comenzado el proceso de descarga del tren con el que están relacionados, mientras que los camiones utilizados para dejar un contenedor en la terminal (camiones a descargar) tampoco suelen llegar después de que se haya cerrado la carga del tren con el que están vinculados.

El tiempo de estancia de los contenedores en las terminales depende de las preferencias de sus propietarios, existiendo ciertos clientes que usan las terminales de origen y/o de destino como lugar de almacenamiento, mientras que otros llevan contenedores a la terminal de origen con poca antelación respecto a su salida en tren o los retiran de la terminal de destino poco después de su llegada en tren.

Por último, las entrevistas con expertos de RENFE Operadora y de ADIF han permitido conocer parte de los sistemas de información empleados por cada una de estas empresas para gestionar el transporte y la manipulación de contenedores. Estos sistemas de información aparecen descritos, con más detalle, en ciertos documentos publicados en sus páginas web.

RENFE Operadora dispone de un sistema de venta "on-line", llamado ContainerClick, para reservar huecos en un tren multicliente o en varios trenes multicliente si el trayecto a realizar no queda cubierto por un único tren (véanse más detalles en Vía Libre, 2008b y en RENFE Operadora, 2012e). Los trenes cliente se contratan a través de otro canal de venta. Esta empresa también posee dos sistemas de información operacionales, SACIM y SACICO, que permiten obtener información sobre las plataformas y los contenedores transportados por cada tren cliente/multicliente, además de poder monitorizar su tráfico, en tiempo real, por la red ferroviaria (véanse más detalles en RENFE Operadora, 2007). Los gestores de las terminales de ADIF tienen acceso a la información recogida en estos tres sistemas de información, de tal forma que pueden planificar su trabajo diario, al conocer, de ante mano, la llegada/salida de cada tren y su composición.

ADIF dispone de un sistema de información propio, llamado AGYL (véase una breve presentación en ADIF, 2012d). Este sistema facilita la comunicación entre ADIF y los operadores ferroviarios para simplificar y agilizar el proceso de contratación de nuevos servicios (acceso/salida de nuevos trenes a/de las terminales, etc.) y sirve también como herramienta de apoyo para gestionar las terminales, proporcionando información, en tiempo real, sobre el estado de sus recursos, la ocupación de sus zonas de almacenamiento, etc.

4.4. ANÁLISIS DE FUENTES "ON-LINE" Y ENTREVISTA CON UN EXPERTO INTERNACIONAL

Por último, se han estudiado distintas fuentes "on-line" y se ha entrevistado a un experto internacional en transporte ferroviario de contenedores para ampliar y/o corregir las conclusiones sobre el sistema de estudio que se derivan de la

revisión bibliográfica, las entrevistas con expertos españoles en transporte ferroviario de contenedores y las visitas a terminales españolas.

El estudio de fuentes “on-line” ha permitido identificar varias páginas webs que consolidan información sobre terminales ferroviarias de contenedores españolas e internacionales.

En el caso español, se han encontrado dos páginas webs relevantes: la web de ADIF (ADIF, 2012c) y la web de Puertos del Estado (Puertos del Estado, 2012).

En la web de ADIF, citada con anterioridad en el apartado 4.3, se recoge información sobre las terminales interiores que esta empresa administra. Para cada terminal, se muestran: los servicios que presta, el horario de prestación de cada servicio, ciertas características relativas al diseño de sus recursos e infraestructuras (tipo y número de grúas; tipo, número y longitud de las vías; etc.) y una vista área de su layout. El estudio de esta información no ha desvelado conclusiones adicionales respecto a las presentadas en los apartados 4.2 y 4.3.

La web de Puertos del Estado, citada también con anterioridad en el apartado 4.3, presenta accesos directos a las webs de 28 puertos españoles. Tras analizar estas 28 webs, sólo se han encontrado 6 puertos (Algeciras, Bilbao, Barcelona, Gijón, Marín-Ría de Pontevedra y Valencia) que proporcionen información escrita o gráfica sobre sus terminales ferroviarias de contenedores. Estas terminales presentan vías de carga/descarga lejos de los muelles y son muy similares a las terminales interiores administradas por ADIF, ya que trabajan con contenedores, cargan contenedores directamente sobre las plataformas de los trenes, apilan contenedores en el suelo de la terminal y son atendidas por grúas móviles y/o pórtico. Marín-Ría de Pontevedra es el único puerto donde se identifica explícitamente que, además de disponer de vías de carga/descarga lejos de los muelles, existen otras vías cerca de estos para el intercambio directo tren-barco de contenedores.

En el ámbito internacional, destacan otras dos páginas webs relativas a dos organizaciones: la Asociación de Intermodal de Norteamérica (que representa los intereses de la industria del transporte intermodal en Norteamérica) y el grupo de interés sobre terminales intermodales AGORA (que, según se expuso en el apartado 2.2.3, surge tras la colaboración de distintos agentes relacionados con el transporte intermodal en un proyecto impulsado por la Comisión Europea). Ambas webs ofrecen información sobre múltiples terminales ferroviarias de contenedores norteamericanas y europeas. Esta información hace referencia a: el número de

modos de transporte presentes en cada terminal (ferrocarril, carretera, marítimo y/o fluvial), el sistema empleado para transportar contenedores sobre trenes (contenedores sobre plataformas, semirremolques cargados con un contenedor sobre plataformas, etc.), ciertas características de diseño que presentan los recursos y las infraestructuras de cada terminal (tipo y número de grúas, número y longitud de las vías de carga/descarga, capacidad de almacenamiento, etc.), su layout y su horario de apertura/cierre. Del mismo modo, se han encontrado diferentes páginas web donde el gobierno australiano y un operador ferroviario australiano proporcionan información sobre parte de las terminales ferroviarias de contenedores que existen en esta región. Al no haber encontrado webs equivalentes para otras zonas, como África, Asia o Sudamérica, el estudio de fuentes "on-line" internacionales ha quedado restringido a terminales norteamericanas, europeas y australianas.

Las fuentes "on-line" internacionales, al igual que las españolas, sólo permiten realizar un estudio parcial de las terminales, ya que, aparte de los modos de transporte presentes en cada terminal, del sistema utilizado para transportar contenedores sobre trenes y del horario de apertura/cierre, no recogen características adicionales sobre su operativa diaria.

La página web de la Asociación de Intermodal de Norteamérica proporciona información sobre 12 operadores ferroviarios y más de 200 terminales ferroviarias de contenedores ubicadas en Canadá, Estados Unidos y México (IANA, 2012). La Figura 4.1 muestra parte de las terminales recogidas en esta web, junto a las rutas realizadas por 10 de los 12 operadores ferroviarios norteamericanos identificados anteriormente.

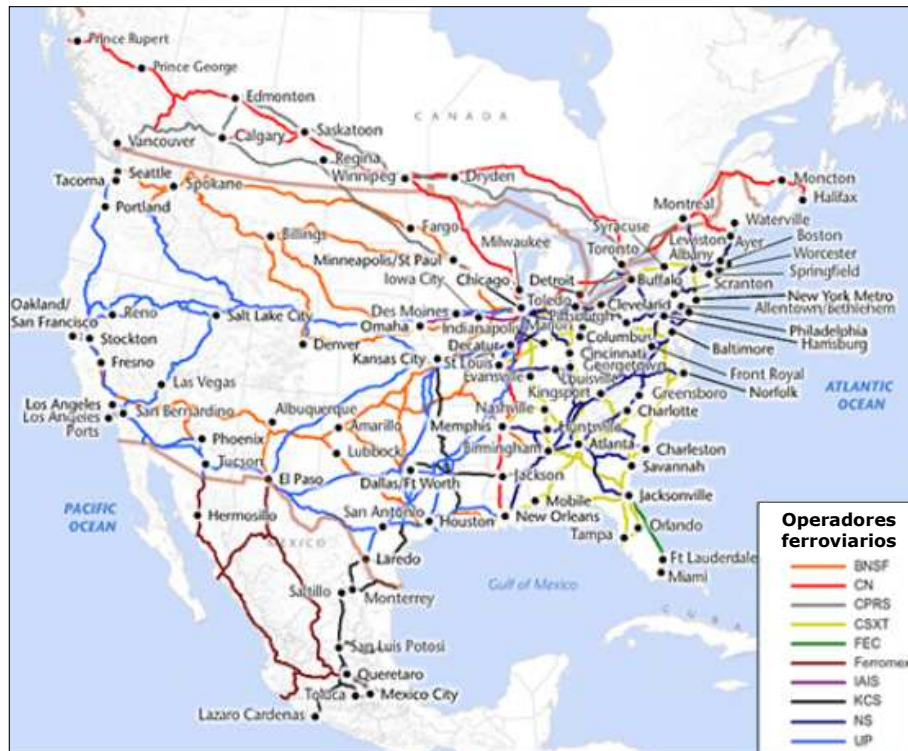


Figura 4.1. Principales terminales ferroviarias de contenedores norteamericanas y rutas de operadores ferroviarios. Fuente: adaptación de IANA (2012).

Para el estudio de esta web, se han seleccionado las terminales atendidas por 7 operadores ferroviarios que mueven trenes entre 10 ó más nodos, lo que cubre en torno al 85% de las terminales ferroviarias de contenedores norteamericanas. Los operadores estudiados han sido Burlington Northern Santa Fe (representado por las siglas BNSF en la Figura 4.1), Canadian National (CN), Canadian Pacific (CPRS), CSX Intermodal (CSXT), Kansas City Southern (KCS), Norfolk Southern (NS) y Union Pacific (UP). A continuación, se han clasificado las terminales entre las que cada operador envía carga según: su localización dentro de la red ferroviaria, el tipo de sistema utilizado para transportar contenedores sobre trenes, su capacidad de almacenamiento, sus grúas y sus vías.

Entre los nodos estudiados, sólo se han encontrado dos terminales ferroviarias situadas dentro de puertos. Al igual que en apartados anteriores, ambas terminales poseen grúas pórtico y vías de carga/descarga lejos de los muelles. Las restantes terminales son interiores y suelen disponer de grúas pórtico, cargadores frontales o laterales y una zona (más o menos amplia) para almacenar plataformas porta contenedores y/o semirremolques cargados con un contenedor. Otras configuraciones menos habituales emplean un solo tipo de grúa o almacenan contenedores en el suelo de la terminal. Este estudio ha revelado también que más del 40% de las terminales interiores estudiadas tienen una zona de clasificación a unos metros de la zona de carga/descarga.

El uso de plataformas bimodales, empleado por los operadores ferroviarios norteamericanos Triple Crown Services y Wabash National como sistema de transporte, parece ser menos común que el transporte de contenedores/semirremolques sobre las plataformas de un tren (Triple Crown Services, 2012 y Wabash National, 2012).

La página web de AGORA proporciona información sobre más de 120 terminales interiores situadas en Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, España, Francia, Italia, Países Bajos, Polonia, República Checa, Rumania, Suecia y Suiza (véanse estas terminales en la Figura 4.2) (AGORA, 2012).



Figura 4.2. Terminales ferroviarias de contenedores europeas recogidas en la web AGORA.
Fuente: AGORA (2012).

Para el estudio de esta web, se han clasificado todas las terminales disponibles según: el sistema empleado para transportar contenedores sobre trenes, su localización dentro de la red ferroviaria y las principales características de diseño que hacen referencia a sus recursos e infraestructuras (tipo y número de grúas, número y longitud de las vías de carga/descarga, capacidad de almacenamiento, etc.).

Este estudio ha revelado que las terminales ferroviarias europeas manipulan mayoritariamente contenedores, aunque algunas terminales de Alemania, Austria y Suiza cargan/descargan camiones completos sobre las plataformas de los trenes (AGORA, 2012; Ministerio de Fomento, 2012a).

Las terminales que cargan/descargan contenedores sobre las plataformas de los trenes pueden conectar dos o tres modos de transporte: ferrocarril-carretera, fluvial-carretera o ferrocarril-carretera-fluvial. Estos dos últimos tipos de terminales están presentes en países, como Alemania, Austria, Bélgica o Francia, donde los ríos son navegables. En otros países, como España, Italia o Polonia, no se han registrado terminales de este tipo. Como en casos anteriores, las terminales ferroviarias situadas en puertos suelen disponer de: grúas pórtico, otras grúas que se pueden mover entre las distintas zonas de la terminal (como, por ejemplo, grúas móviles) y vías de carga/descarga emplazadas lejos de los muelles. Aunque, minoritariamente, se han identificado ciertas terminales alemanas y austríacas que presentan, adicionalmente, vías de carga/descarga cerca de los muelles para transferir contenedores de forma directa entre barcos y trenes.

Las terminales europeas que intercambian contenedores entre el ferrocarril y la carretera guardan mucha similitud con las terminales españolas estudiadas en el apartado 4.3. Las grúas móviles y pórtico son los equipos más utilizados en Europa, excepto en algunas terminales de Bélgica, donde se utilizan carretillas pórtico en lugar de grúas móviles. Según lo indicado en el subapartado 2.5.2, a diferencia de las grúas móviles y pórtico, las carretillas pórtico sólo pueden apilar contenedores en una fila. Esto implica diseñar zonas de almacenamiento menos eficientes en términos de espacio utilizado, al tener que crear pasillos entre filas de contenedores para que las carretillas puedan moverse. La página web de AGORA ha permitido identificar que, al igual que en España, existen terminales europeas que trabajan con grúas móviles y pórtico en Alemania, Austria, Bélgica, Hungría, Italia, Países Bajos, Polonia, República Checa, Rumania y Suecia; además de existir terminales que sólo trabajan con grúas móviles en Alemania, Austria, Bélgica, Bulgaria, Italia, Polonia, República Checa y Suecia. Esta revisión también ha permitido desvelar la existencia de otras terminales europeas que sólo utilizan grúas pórtico en Alemania, Austria, Bélgica, Polonia, Suecia y Suiza. Como en el caso español, las terminales europeas difieren, entre otros aspectos, según: el número de haces de vías de carga/descarga disponibles, el número de vías por haz y la disposición de las infraestructuras que están bajo pórtico. Por último, este estudio ha revelado que más del 50% de las terminales europeas tienen una zona de clasificación junto a las vías de carga/descarga o a pocos kilómetros de distancia.

La documentación publicada por la Comisión Australiana de Transporte en 2008 ha permitido identificar 31 terminales australianas de transporte intermodal que manipulan anualmente más de 10.000 unidades de carga equivalentes de 20

pies (conocidas en inglés por las siglas TEUs, "Twenty Foot Equivalent Units") (NTC Australia, 2012).

Qube Logistics trabaja como operador ferroviario en ocho de estas terminales (Qube Logistics, 2012). Cuatro de ellas están en el interior del país (en Acacia Ridge, Dynon Road, Somerton y Yennora), mientras que las cuatro restantes están integradas en los puertos de Brisbane, Fremantle, Botany y Vic Dock. Tras estudiar los servicios que cada terminal proporciona y su layout, se han identificado múltiples similitudes entre las terminales australianas y las europeas. Las terminales australianas interiores trabajan con contenedores, cargan contenedores directamente sobre las plataformas de los trenes, utilizan grúas móviles y/o pórtico para intercambiar contenedores entre modos y para apilarlos sobre el suelo de la terminal, disponen de uno o varios haces de vías de carga/descarga y, en ciertos casos (como sucede en las terminales de Acacia Ridge o Dynon), disponen de una zona de clasificación. Las terminales ferroviarias integradas en puertos están lejos de los muelles y poseen infraestructuras y equipos similares a las terminales interiores.

La entrevista mantenida con un experto internacional que trabaja para un operador ferroviario alemán se realizó con un doble objetivo: por un lado, corroborar la información publicada en la web de AGORA para las terminales alemanas y por otro lado, determinar las principales similitudes y diferencias que existen entre Alemania y España en relación al transporte de contenedores por ferrocarril.

Usando un cuestionario con más de 40 preguntas, se recabó información sobre: el uso del transporte ferroviario de mercancías en Alemania, los operadores ferroviarios existentes, el sistema empleado para transportar contenedores sobre trenes, la ubicación de las terminales ferroviarias de contenedores, las funciones que estas terminales realizan, los equipos que utilizan, el tipo de contenedores que manejan y el tipo de trenes con los que trabajan.

Según el primer objetivo, se ha establecido que la información recabada en esta entrevista es consistente con la publicada en la web de AGORA en relación a: el número de modos de transporte presentes en las terminales alemanas, el sistema empleado para transportar contenedores sobre trenes y el tipo de grúas disponibles.

En relación con el segundo objetivo, se ha identificado que las terminales ferroviarias de contenedores alemanas son similares a las españolas según: su

ubicación, las funciones que realizan, los equipos que utilizan y el tipo de contenedores y de trenes que manejan. Como en España, las terminales ferroviarias de contenedores alemanas pueden estar integradas en puertos o en el interior de la red ferroviaria; pueden conectar dos o tres modos de transporte (ferrocarril-marítimo, ferrocarril-carretera, ferrocarril-carretera-marítimo o ferrocarril-carretera-fluvial); se ocupan, principalmente, de intercambiar contenedores entre modos de transporte usando grúas móviles y pórtico, además de poder clasificar plataformas; trabajan con contenedores de distintos tamaños, siendo los más usuales los de 20 pies; y atienden trenes multiclente y cliente, que, al igual que en el caso español, suelen circular por la red en horario nocturno para no interferir con el transporte de pasajeros. Esta entrevista también ha permitido revelar diferencias entre Alemania y España según: el uso del transporte ferroviario de mercancías, el número de operadores ferroviarios existentes, el sistema que empleado para transportar contenedores sobre trenes y la longitud de los trenes. En Alemania, el transporte ferroviario de mercancías es más común que en España; existe un mayor número de operadores ferroviarios; cargan mayoritariamente contenedores sobre las plataformas de los trenes, sin embargo, en ciertos casos, también transportan camiones completos; y la longitud de los trenes puede ser superior a la de los españoles, pudiendo llegar a alcanzar los 700 metros.

Al igual que ocurre con el análisis de fuentes “on-line”, esta entrevista sólo ha permitido estudiar parcialmente las terminales alemanas, al no proporcionar gran información sobre sus reglas de operación (por ejemplo, reglas empleadas para asignar grúas a tareas, para almacenar contenedores, etc.).

Capítulo 5

MODELO CONCEPTUAL DE LAS TERMINALES A REPRESENTAR CON LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN

5.1. INTRODUCCIÓN

El primer paso para abordar la tercera fase de la metodología descrita en el apartado 3.5 ("Diseño, desarrollo y experimentación con la plataforma flexible de simulación") consiste en desarrollar el modelo conceptual de las terminales ferroviarias de contenedores a representar con la plataforma flexible de simulación. Este modelo conceptual captura aquellos aspectos de la realidad, estudiada en el capítulo 4, que son relevantes para abordar el problema de estudio, caracterizado en el capítulo 3, y sirve como paso previo a la implementación de la plataforma flexible, presentada en el capítulo 6.

Siguiendo las indicaciones proporcionadas por Banks et al. (2001) y Pidd (2004) para el desarrollo de estudios de simulación, el modelo conceptual ha sido creado de forma gradual, comenzando con la identificación general de las terminales a representar y continuando con una definición más precisa de cada una de ellas, primero, en términos de diseño y, después, en términos de operación.

Este desarrollo gradual queda reflejado a lo largo de los distintos apartados que componen este capítulo. En el apartado 5.2, se identifica el rango de terminales a representar según sus principales funciones, elementos y unidades de carga a manipular. En el apartado 5.3, se precisan las distintas terminales a representar según las características de diseño relativas a sus recursos e infraestructuras (tipo, número, capacidad, etc.) y según la disposición de estos elementos dentro del espacio disponible. Las características relativas a la demanda, junto a las reglas de operación y a los horarios empleados para satisfacerla, se exponen en el apartado 5.4. Los apartados 5.5 y 5.6 recogen otros aspectos relevantes que deben ser analizados antes de implementar la plataforma flexible de simulación. Entre estos aspectos, se encuentra la identificación de las relaciones que existen entre las terminales a representar y su entorno y la definición de indicadores para evaluar su funcionamiento.

5.2. IDENTIFICACIÓN GENERAL DE LAS TERMINALES A REPRESENTAR

Entre la amplia variedad de terminales de transporte intermodal identificadas en el capítulo 4, la plataforma flexible de simulación presentada en esta tesis permite representar y estudiar terminales ferroviarias de contenedores que pueden operar en el interior de una red, o dentro de una terminal portuaria o fluvial donde las vías de carga/descarga están lo suficientemente alejadas de los

muelles como para no permitir el intercambio directo de contenedores entre trenes y barcos. La principal diferencia que existe entre ambos sistemas radica en que las terminales interiores reciben/expiden contenedores usando trenes y camiones; mientras que las terminales integradas en puertos pueden recibir/expedir también tractores con plataforma, que representan el movimiento de contenedores entre los subsistemas marítimo/fluvial y ferroviario.

Ambos tipos de terminales disponen de una zona de carga/descarga dedicada al almacenamiento de contenedores y a su intercambio entre trenes y camiones/tractores con plataforma. En esta zona, se considera que:

- La unidad de carga a manipular es el contenedor, no la caja móvil ni el semirremolque.
- Los contenedores se transportan directamente sobre las plataformas de los trenes, no sobre semirremolques ni sobre camiones completos.
- Las plataformas de los trenes no son bimodales.
- La longitud de los trenes entrantes/salientes puede superar la de las vías de carga/descarga.
- El suelo de la terminal es utilizado para apilar contenedores en caso de no producirse un intercambio directo de carga entre modos de transporte.
- Las grúas móviles y/o pórtico son los equipos utilizados para manipular contenedores.
- Se pueden trasbordar contenedores entre trenes, si existen grúas pórtico.

Adicionalmente, las terminales ferroviarias de contenedores a estudiar pueden disponer de una zona de clasificación, construida sobre un terreno llano y situada más o menos cerca de la zona de carga/descarga, donde se utilizan tractores de maniobras para formar nuevos trenes salientes a partir de la clasificación, consolidación, desconsolidación, segregación y agregación de las plataformas transportadas por otros trenes entrantes.

De acuerdo con el estudio específico de terminales presentado en el capítulo 4, la mayor parte de las terminales ferroviarias españolas, europeas y australianas estudiadas son de este tipo. En Norte América, también existen terminales que manipulan contenedores. Sin embargo, en este último caso, suele ser más frecuente almacenarlos sobre plataformas porta contenedores que sobre el suelo de la terminal.

Otras terminales ferroviarias de contenedores donde existan funciones, unidades de carga, sistemas para transportar contenedores sobre trenes, formas para almacenar contenedores, equipos y/o vías de clasificación diferentes a las anteriormente expuestas quedan fuera del ámbito de estudio cubierto por la plataforma flexible de simulación de esta tesis.

5.3. DETALLE DE LAS TERMINALES A REPRESENTAR SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO

La plataforma flexible de simulación presentada en esta tesis permite representar y estudiar diferentes terminales ferroviarias de contenedores donde, además de variar las funciones definidas en el apartado 5.2 (intercambio de contenedores entre modos, trasbordo de contenedores entre trenes y/o formación de nuevos trenes salientes a partir de las plataformas transportadas por otros trenes entrantes), varían los siguientes aspectos relativos a su diseño: el tipo de recursos y de infraestructuras existentes, otras características de diseño relativas a estos elementos (número, capacidad, etc.) y su disposición dentro de la terminal.

Estas diferencias, identificadas previamente en la caracterización del problema de estudio (subapartado 3.3.2), han sido empleadas para estructurar este apartado en tres subapartados y así conceptualizar, de forma gradual, el diseño de las distintas terminales a representar.

5.3.1. DEFINICIÓN DEL TIPO DE RECURSOS Y DE INFRAESTRUCTURAS EXISTENTES EN LAS TERMINALES A REPRESENTAR

La configuración con mayor de variedad de recursos y de infraestructuras a representar por la plataforma flexible de simulación para una terminal ferroviaria interior es la indicada en la Figura 5.1. En esta configuración, existen dos zonas, una zona de carga/descarga y una zona de clasificación, compuestas por los siguientes elementos:

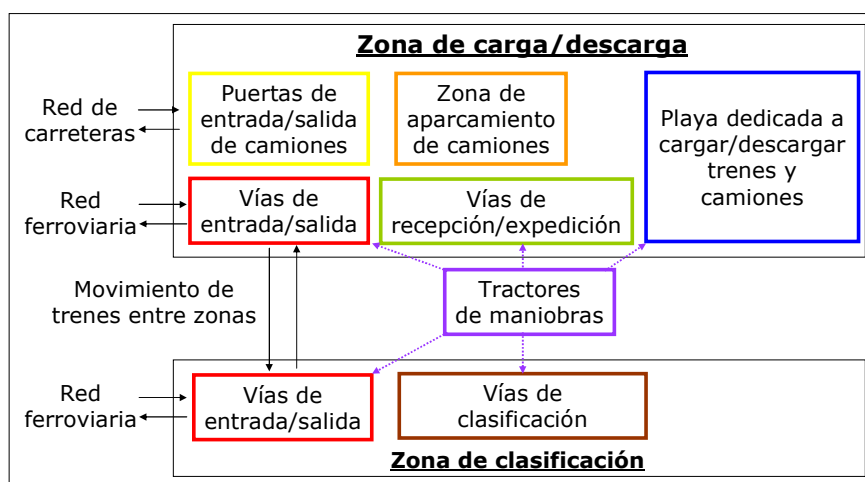


Figura 5.1. Configuración con mayor variedad de recursos y de infraestructuras a representar. Fuente: elaboración propia.

- Una o varias puertas de entrada/salida de camiones (véanse en amarillo en la Figura 5.1), que conectan la zona de carga/descarga con la red de carreteras.
- Una zona de aparcamiento de camiones (véase en naranja en la Figura 5.1), donde los camiones que entran esperan hasta que pueden ser atendidos en la playa de carga/descarga de trenes y camiones o donde los camiones que salen esperan hasta que una puerta de entrada/salida se desocupe.
- Una playa dedicada a cargar/descargar trenes y camiones (véase en azul en la Figura 5.1), utilizada para almacenar contenedores y para intercambiarlos entre modos y/o entre trenes.
- Una o varias vías de entrada/salida (véanse en rojo en la Figura 5.1), que conectan la zona de carga/descarga y la zona de clasificación entre sí y con la red ferroviaria.
- Una o varias vías de recepción/expedición (véanse en verde en la Figura 5.1), empleadas para retirar/colocar la locomotora de/a los trenes entrantes/salientes, para aparcar los trenes entrantes hasta que una vía de carga/descarga se libere, para aparcar los trenes salientes hasta que llegue su hora de salida y, si se requiere y su longitud lo permite, para romper trenes largos que no pueden ser procesados en las vías de carga/descarga. Esta última tarea, identificada a partir de las entrevistas con expertos y a partir de las visitas a terminales españolas, no ha sido estudiada, con anterioridad, en la literatura revisada a lo largo del subapartado 4.2.1.
- Varias vías de clasificación (véanse en marrón en la Figura 5.1), construidas sobre un terreno llano, que pueden ser utilizadas para formar nuevos trenes

salientes a partir de la clasificación, consolidación, desconsolidación, segregación y agregación de las plataformas transportadas por otros trenes entrantes, además de poder ser utilizadas para realizar las mismas tareas que las vías de recepción/expedición.

- Uno o varios tractores de maniobras (véanse en morado en la Figura 5.1), empleados para mover plataformas entre la zona de carga/descarga y la zona de clasificación, entre las vías electrificadas (vías de recepción/expedición) y no electrificadas (vías de carga/descarga) de la zona de carga/descarga y entre las vías que componen la zona de clasificación.

Según lo que indique el usuario de la plataforma flexible de simulación como parámetro de entrada, se podrán representar además otras terminales interiores, también identificadas a partir de las fuentes de información estudiadas en el capítulo 4, donde:

- No exista zona de aparcamiento de camiones.
- Existan vías de recepción/expedición, pero no zona de clasificación.
- Exista zona de clasificación, pero no vías de recepción/expedición.

Una definición más precisa de las terminales interiores a representar se alcanza al definir los recursos y las infraestructuras que componen la playa dedicada a cargar/descargar trenes y camiones (marcada en azul en la Figura 5.1). Según muestra la Figura 5.2, esta playa está compuesta por:

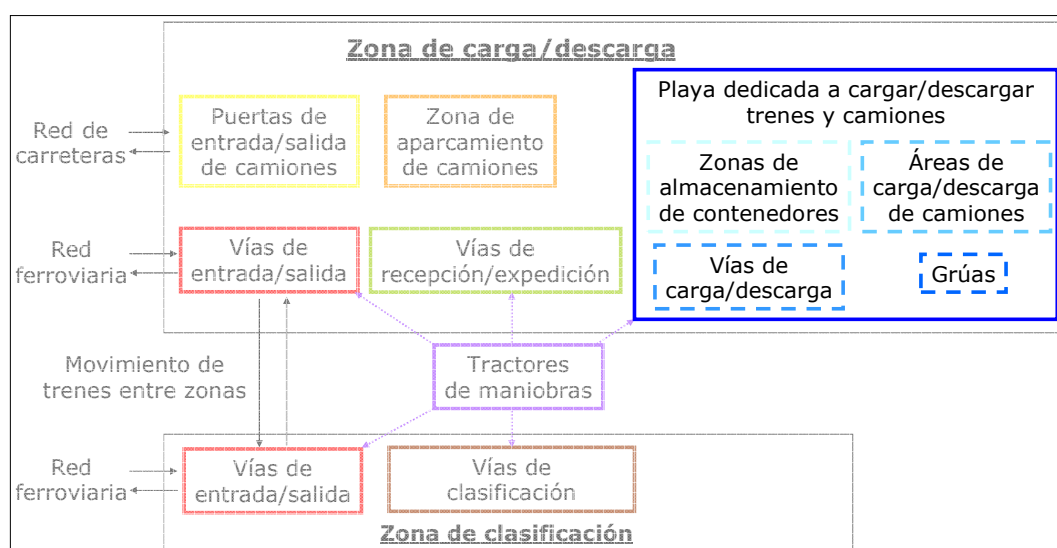


Figura 5.2. Recursos e infraestructuras que componen la playa dedicada a cargar/descargar trenes y camiones. Fuente: elaboración propia.

- Una o varias zonas empleadas para almacenar contenedores.
- Una o varias áreas utilizadas para carga/descarga camiones.
- Una o varias vías usadas para cargar/descargar trenes.
- Una o varias grúas encargadas de: almacenar contenedores, cargar/descargar trenes y camiones y, si procede, trasbordar contenedores entre trenes. La plataforma flexible de simulación permite representar terminales donde trabajan grúas móviles y/o pórtico. Según lo indicado a lo largo del subapartado 2.5.2 y del capítulo 4, la utilización de estos equipos permiten diseñar zonas de almacenamiento de contenedores eficientes en términos de espacio utilizado, ya que los contenedores pueden ser apilados de forma longitudinal formando filas próximas entre sí, sin necesidad de crear pasillos entre filas para que las grúas puedan moverse.

La plataforma flexible de simulación es capaz de representar seis diseños de playa de carga/descarga de trenes y camiones, donde puede variar el tipo de grúas empleadas, el tipo de zonas utilizadas para almacenar contenedores y el número de haces de vías de carga/descarga. Estos diseños han sido identificados a partir de las fuentes de información estudiadas en el capítulo 4 (revisión bibliográfica, visitas a terminales españolas y fuentes “on-line”).

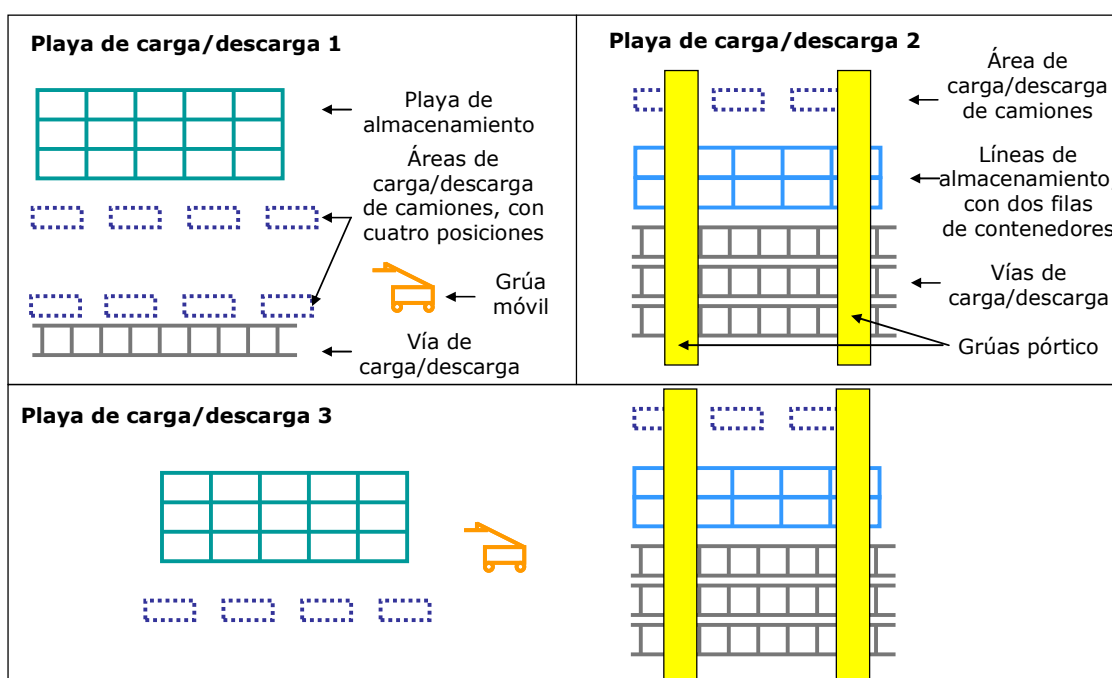


Figura 5.3. Diseños básicos de playa de carga/descarga de trenes y camiones a representar.
Fuente: elaboración propia.

El primer diseño, representado como “Playa de carga/descarga 1” en la Figura 5.3, está compuesto por: una o varias grúas móviles; una o varias vías de

carga/descarga, agrupadas en un único haz; una o varias zonas de almacenamiento de contenedores, situadas a unos metros de las vías de carga/descarga (en adelante, estas zonas recibirán el nombre de playas de almacenamiento); y varias áreas de carga/descarga de camiones, compuestas, a su vez, por un número máximo de posiciones donde se colocan los camiones a cargar/descargar. En este caso, las áreas de carga/descarga de camiones estarán situadas en las proximidades de las playas de almacenamiento y de las vías de carga/descarga.

El segundo diseño, representado como “Playa de carga/descarga 2” en la Figura 5.3, posee: una o varias grúas pórtico; una zona de almacenamiento de contenedores, compuesta por una o varias filas de contenedores situadas de forma paralela a las vías de carga/descarga y con idéntica longitud que éstas (en adelante, esta zona recibirá el nombre de líneas de almacenamiento); una o varias vías de carga/descarga, agrupadas en un único haz; y un área de carga/descarga de camiones. Todas las infraestructuras mencionadas anteriormente se encuentran bajo las grúas pórtico.

El tercer diseño, representado como “Playa de carga/descarga 3” en la Figura 5.3, presenta: una o varias grúas móviles; una o varias grúas pórtico; una o varias vías de carga/descarga, agrupadas en un único haz y situadas bajo pórtico; un área de carga/descarga de camiones también situada bajo pórtico; una playa de almacenamiento; y un área de carga/descarga de camiones situada en las proximidades de la playa de almacenamiento. Según la terminal a simular, el usuario de la plataforma flexible puede configurar la existencia o no de líneas de almacenamiento bajo pórtico.

Los restantes tres diseños de playa de carga/descarga disponen de varios haces de vías de carga/descarga y son combinación de los diseños ya definidos. El cuarto diseño dispone de dos o más playas de carga/descarga atendidas sólo por grúas móviles (playas similares a la representada como “Playa de carga/descarga 1” en la Figura 5.3), el quinto diseño posee dos o más playas atendidas por grúas móviles y pórtico (playas similares a la representada como “Playa de carga/descarga 3” en la Figura 5.3), mientras que el sexto diseño está compuesto por una o más playas atendidas sólo por grúas móviles y una o más playas atendidas por grúas móviles y pórtico.

Cabe destacar que una de las principales fuentes de complejidad de las playas de carga/descarga a estudiar en esta tesis reside en la operación de sus grúas, al existir frecuentemente interacciones entre equipos encargados de realizar una misma tarea (por ejemplo, cuando se utilizan varias grúas para descargar un

mismo tren) y/o interacciones entre las distintas tareas que puede realizar un mismo equipo (por ejemplo, cuando una misma grúa puede elegir entre atender a un tren o a un camión). Este aspecto de operación será tratado con más detalle en el apartado 5.4.

Las fuentes de información estudiadas a lo largo del capítulo 4 han permitido identificar que no existen diferencias entre el tipo de recursos y de infraestructuras que utilizan las terminales ferroviarias interiores y las terminales ferroviarias integradas en puertos donde las vías de carga/descarga están alejadas de los muelles; ya que, en ambos casos, los camiones y los tractores con plataforma son tratados de forma análoga. Sin embargo, se ha observado que, en ciertos casos, las terminales ferroviarias integradas en puertos no presentan puertas de entrada/salida para separar el subsistema ferroviario del subsistema marítimo/fluvial. Esta diferencia también puede ser representada por el usuario de la plataforma flexible de simulación.

5.3.2. DETALLE DE OTRAS CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO A CONFIGURAR PARA CADA TIPO DE RECURSO E INFRAESTRUCTURA

Las configuraciones indicadas en el apartado anterior pueden detallarse aún más al precisar nuevas características de diseño relativas a sus recursos e infraestructuras.

Según este aspecto, el usuario de la plataforma flexible de simulación puede configurar terminales ferroviarias de contenedores donde varían las características presentes en la Tabla 5.1. Esta tabla muestra, en columnas independientes, la fila que ocupan cada característica a configurar, el nombre de cada característica y su rango de variación.

Fila	Características a configurar	Rango de variación
1	Número de vías de entrada/salida en zona de clasificación	0-2
2	Número de vías de clasificación	0-20
3	Longitud de vías de clasificación	300-700 metros
4	Número de tractores de maniobras	1-3
5	Número de puertas de entrada/salida de camiones/tractores con plataforma	0-10
6	Número máximo de camiones/tractores con plataforma que pueden esperar simultáneamente en la zona de aparcamiento	0-30
7	Número de vías de entrada/salida en zona de carga/descarga	1-2
8	Número de vías de recepción/expedición	0-5
9	Longitud de vías de recepción/expedición	300-700 metros
10	Número de playas de carga/descarga de trenes y camiones	1-4
11	Número de vías de carga/descarga	1-2, para playas donde sólo existen grúas móviles 1-8, para playas donde existen grúas pórtico
12	Longitud de vías de carga/descarga	300-700 metros
13	Número de playas de almacenamiento	1-2, para playas donde sólo existen grúas móviles 0-1, para playas donde existen grúas pórtico
14	Largo de la playa de almacenamiento	1-700 metros
15	Ancho de la playa de almacenamiento	1-100 metros
16	Número de líneas de almacenamiento	0-12
17	Número de áreas de carga/descarga de camiones/tractores con plataforma	2-4, para playas donde sólo existen grúas móviles 1-2, para playas donde existen grúas pórtico
18	Número máximo de camiones/tractores con plataforma que pueden ser atendidos simultáneamente en cada área carga/descarga	1-30
19	Número de grúas pórtico	0-3
20	Número de grúas móviles	0-5

Tabla 5.1. Rango de variación para las características de diseño relativas a los recursos y a las infraestructuras de las terminales ferroviarias a representar. Fuente: elaboración propia.

Las características situadas en las filas 1-3 de la Tabla 5.1 (número de vías de entrada/salida, etc.) hacen referencia a elementos presentes en la zona de clasificación, la característica presente en la fila 4 (número de tractores de maniobras) está relacionada con los tractores de maniobras, mientras que el resto

de características (filas 5-20) hacen referencia a los elementos existentes en la zona de carga/descarga: número de puertas de entrada/salida de camiones/tractores con plataforma, número máximo camiones/tractores con plataforma que pueden esperar simultáneamente en la zona de aparcamiento, etc.

Según aparece en la fila 10 de la Tabla 5.1, el usuario de la plataforma flexible de simulación puede configurar terminales que poseen entre una y cuatro playas de carga/descarga de trenes y camiones/tractores con plataforma. Para cada playa, el usuario debe particularizar las características recogidas en las filas 11-19 (número de vías de carga/descarga, longitud de las vías de carga/descarga, etc.). Ciertas características tienen un rango de variación diferente según el tipo de grúas que atiende cada playa (véase, por ejemplo, el número de vías de carga/descarga, en la fila 11). Además, el límite inferior de otras características puede valer cero (véase, por ejemplo, el número de líneas de almacenamiento, en la fila 16), con el objetivo de representar cada una de las terminales definidas en el subapartado 5.3.1. La característica “número de grúas móviles” (situada en la fila 20) se define para toda la zona de carga/descarga de trenes y camiones/tractores con plataforma; ya que, en caso de existir varias playas de carga/descarga, estos equipos pueden moverse entre ellas.

Las 20 características presentes en la Tabla 5.1 han sido identificadas a partir del estudio específico de terminales presentado en el capítulo 4. Para la mayor parte de ellas, ha sido sencillo acotar su rango de variación a partir de la información encontrada en la revisión bibliográfica, las visitas a terminales españolas y las fuentes de información “on-line”. Sin embargo, estas fuentes de información han proporcionado escasos detalles sobre los siguientes tres aspectos: número de puertas de entrada/salida de camiones/tractores con plataforma (véase la fila 5 de la Tabla 5.1), número máximo de camiones/tractores con plataforma que pueden esperar simultáneamente en la zona de aparcamiento (véase la fila 6) y número máximo de camiones/tractores con plataforma que pueden ser atendidos simultáneamente en las áreas de carga/descarga que están junto a las playas de almacenamiento y junto a las vías de carga/descarga (véase la fila 18). Para estos aspectos, se ha considerado oportuno establecer un rango de variación suficientemente grande como para representar los pocos escenarios consultados que proporcionan información explícita sobre alguno de ellos (véase, por ejemplo, Rizzoli et al., 2002 o Lee et al., 2006a), así como otras terminales que hayan podido quedar fuera del estudio realizado a lo largo del capítulo 4.

Los tiempos de operación empleados para ejecutar las distintas tareas que tienen lugar en una terminal (entrada de camiones/tractores con plataforma,

descarga de camiones/tractores con plataforma, colocación de contenedores en la playa de almacenamiento, etc.) también han sido definidos como parámetros de entrada a configurar. El usuario de la plataforma flexible de simulación puede definir estos tiempos de forma determinista, siguiendo una distribución triangular o usando una distribución empírica. Los valores deterministas y las distribuciones triangulares son generalmente utilizados como primera aproximación en ausencia de datos más precisos (Law, 2007), habiéndose empleado en varios estudios de simulación relativos a terminales de contenedores (véanse, por ejemplo, Merkuriev et al., 1998; Ambrosino y Tànfani, 2009; Wiese et al., 2009 o Petering, 2011). Si el usuario de la plataforma flexible dispone de datos tomados a partir de la observación directa del sistema a simular, podrían construirse distribuciones empíricas a partir con ellos y utilizarlas para generar los tiempos de operación definidos en la plataforma flexible de simulación.

A partir de las visitas a terminales españolas y de la información publicada en la web de varios proveedores de grúas (véanse, por ejemplo, Hister, 2012 o Konecranes, 2012), se ha identificado que los tiempos de operación de las grúas móviles y pórtico suelen ser distintos. De ahí que el usuario de la plataforma flexible de simulación pueda configurar tiempos diferentes para una misma tarea (por ejemplo, descarga de camiones) según el tipo de grúa que la realice.

Otro aspecto a configurar por parte del usuario de la plataforma flexible de simulación es la velocidad a la que circulan los camiones, los tractores con plataforma, las grúas móviles y los tractores de maniobras por la terminal. Estas velocidades se configuran usando un valor determinista.

5.3.3. TERMINALES A REPRESENTAR SEGÚN LA DISPOSICIÓN DE SUS RECURSOS E INFRAESTRUCTURAS

La plataforma flexible de simulación representa las distancias que separan las distintas infraestructuras de una terminal: puertas de entrada/salida, áreas de carga/descarga de camiones/tractores con plataforma, playas de almacenamiento, vías de carga/descarga, vías de clasificación, etc. Estas distancias, que pueden variar de una terminal a otra condicionando el tiempo que los camiones, los tractores con plataforma, las grúas móviles y los tractores de maniobras tardan en recorrerlas, pueden ser configuradas por el usuario de la plataforma flexible.

Otro aspecto importante relativo al layout es la disposición de las líneas de almacenamiento y del área de carga/descarga de camiones/tractores con plataforma que están bajo las grúas pórtico en la configuración presentada, en el

subapartado 5.3.1, como “Playa de carga/descarga 3”, pues, en ciertos casos, las grúas móviles no pueden acceder a estas infraestructuras. Por ejemplo, en el caso 1 representado en la Figura 5.4, las grúas móviles no pueden acceder a las líneas de almacenamiento y por tanto, tampoco pueden atender la carga de camiones/tractores con plataforma que requieren un contenedor de estas líneas o la descarga de camiones/tractores con plataforma cuyo contenedor deba ser colocado en esa zona. En el caso 2, las grúas móviles sí tienen acceso a las líneas de almacenamiento, pero el espacio que resta entre estas líneas y las vías de carga/descarga les impide maniobrar para cargar/descargar camiones/tractores con plataforma. En el caso 3, las grúas móviles tienen acceso, haciendo uso de su pluma telescópica, tanto a las líneas de almacenamiento como al área de carga/descarga de camiones/tractores con plataforma. El usuario de la plataforma flexible de simulación pueden configurar estos tres diseños además de otros, identificados a partir del estudio específico de terminales presentado en el capítulo 4, donde no existen líneas de almacenamiento o donde éstas están situadas a uno o ambos lados de las vías de carga/descarga.

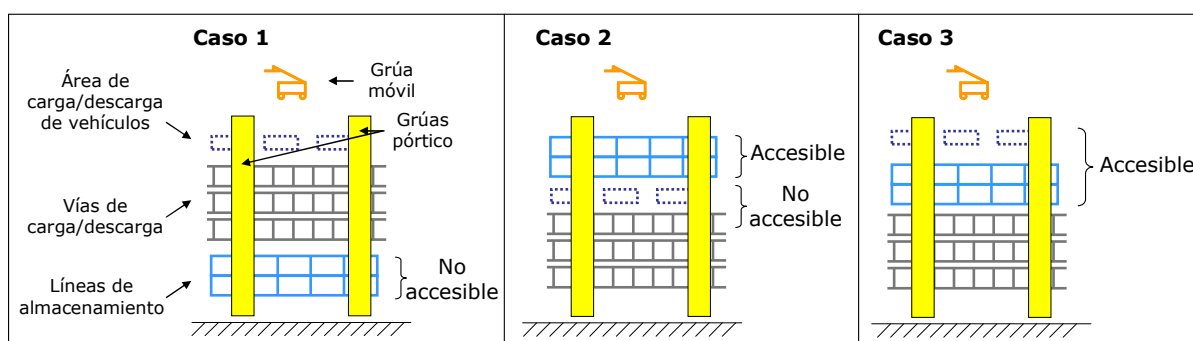


Figura 5.4. Acceso de las grúas móviles a las infraestructuras que están bajo pórtico. Fuente: elaboración propia.

Del mismo modo, la plataforma flexible de simulación permite representar dos layouts alternativos para las playas de carga/descarga donde existen dos vías de carga/descarga atendidas únicamente por grúas móviles. En el primer layout, las vías de carga/descarga están situadas una cerca de la otra, mientras que las áreas de carga/descarga de vehículos y las playas de almacenamiento se encuentran emplazadas a ambos lados del haz de vías (véase el caso 1 de la Figura 5.5). En el segundo layout, las vías están separadas, de tal forma que existe una zona de trabajo entre ellas donde se sitúan las áreas de carga/descarga de vehículos y la playa de almacenamiento (véase el caso 2 de la Figura 5.5).

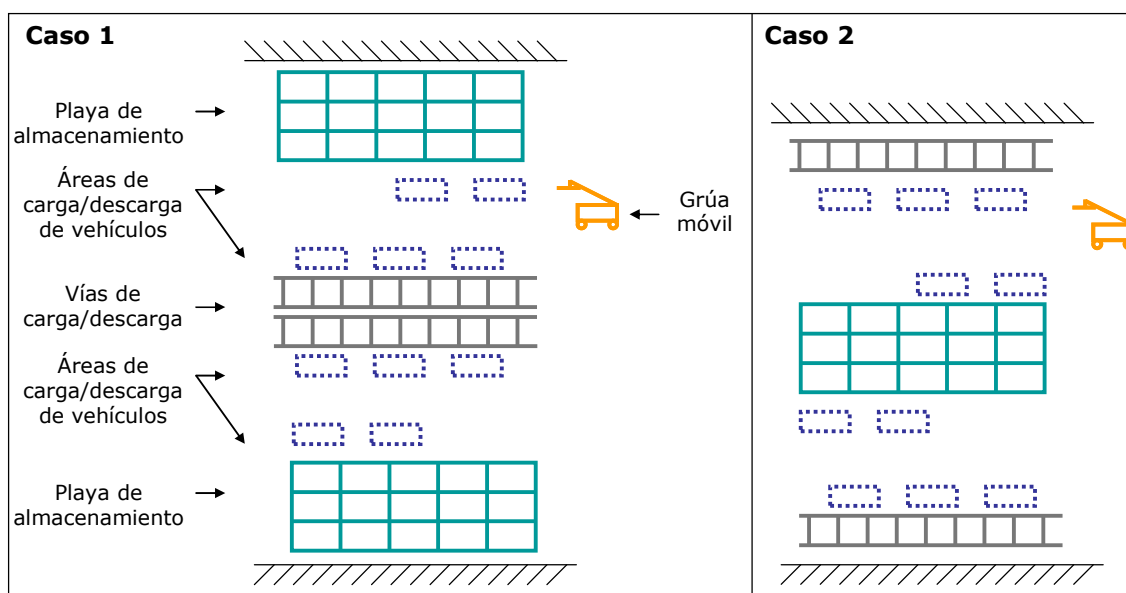


Figura 5.5. Layouts alternativos para las playas de carga/descarga de trenes y camiones atendidas sólo por grúas móviles. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con el estudio específico de terminales presentado en el capítulo 4, el diseño de la mayor parte de las terminales ferroviarias españolas, europeas y australianas estudiadas encaja con lo indicado a lo largo de los subapartados 5.3.1, 5.3.2 y 5.3.3.

5.4. DETALLE DE LAS TERMINALES A REPRESENTAR SEGÚN SUS CARACTERÍSTICAS DE OPERACIÓN

La plataforma flexible de simulación permite representar distintas configuraciones donde tres aspectos de operación, identificados previamente en el subapartado 3.3.2, varían. Estos aspectos hacen referencia, por un lado, a la demanda que atienden las terminales a simular y, por otro, a las reglas de operación y a los horarios que éstas emplean para satisfacerla.

Las distintas reglas de operación representadas en la plataforma flexible se han definido, principalmente, usando la información recabada a partir de las entrevistas con expertos españoles en transporte ferroviario de contenedores y a partir de las visitas a terminales españolas, ya que, en general, las restantes fuentes de información estudiadas en el capítulo 4 (revisión bibliográfica, análisis de fuentes "on-line" y entrevista con un experto internacional) no han proporcionado grandes detalles sobre este aspecto.

Siguiendo el mismo enfoque que los artículos revisados en el subapartado 4.2.1, se ha dividido la operación de las terminales a representar en los siguientes procesos:

- Entrada/salida de trenes.
- Clasificación de plataformas.
- Almacenamiento de contenedores.
- Descarga/carga de trenes y trasbordo de contenedores entre trenes.
- Entrada/salida de camiones/tractores con plataforma.
- Carga/descarga de camiones/tractores con plataforma.

La clasificación anterior ha sido empleada para estructurar este apartado en seis subapartados, donde se detalla la modelización realizada sobre cada proceso y donde se explican sus alternativas de operación. Es relevante destacar que, en ciertos casos, estas alternativas de operación vienen condicionadas por las características de diseño definidas en el apartado 5.3.

5.4.1. ENTRADA/SALIDA DE TRENES

Al igual que las terminales ferroviarias de contenedores visitadas y estudiadas a partir de la revisión bibliográfica (véase el capítulo 4), las terminales a representar con la plataforma flexible de simulación trabajan contra un plan de trenes. Este plan determina el día y la hora de entrada/salida de los trenes en/de la terminal, tiene una periodicidad semanal y suele ser revisado, como mínimo, mensualmente para adaptarse a la demanda, que, generalmente, presenta un patrón estacional.

Como en el caso español, los trenes que componen este plan pueden pertenecer a distintos operadores ferroviarios, ser de tipo cliente o multiclente y estar compuestos por un número variable de plataformas (no bimodales) de 60 pies. Según lo expuesto en el subapartado 4.3, este tipo de plataformas son frecuentemente empleadas por su versatilidad para transportar y combinar distintos tamaños de contenedores.

La longitud de los trenes puede fluctuar entre 300 y 700 metros (16-38 plataformas de 60 pies). De tal forma que la plataforma flexible de simulación puede representar trenes de 450 metros, longitud máxima más habitual según la "Declaración de la Red de ADIF" (ADIF, 2012a), además de otros trenes con longitudes inferiores o superiores que puedan circular por España y por otros países, por ejemplo, de Europa (Ballis y Golias, 2002; ADIF, 2012a; Vía Libre, 2008; y Vía Libre, 2009).

Las plataformas de los trenes pueden entrar/salir en/de la terminal vacías o cargadas con contenedores (unidad de carga más utilizada a lo largo del capítulo 4). Para cada uno de los contenedores que entra en la terminal, ya sea en tren, en camión o en tractor con plataforma, se supone, como en el caso español, que es conocida la posición que ocupa dentro del tren entrante/saliente con el que está vinculado, su tamaño (20, 30 ó 40 pies), su peso (vacío o cargado), el cliente al que pertenece y su próximo destino (esto es, si va a ser cargado en un camión/tractor con plataforma, si va a ser cargado en un tren o si va a ser trasbordado a otro tren). Esta información es un parámetro de entrada para la plataforma flexible de simulación.

La entrada/salida de trenes en/de la zona de carga/descarga viene condicionada por la existencia de vías de recepción/expedición y/o de vías de clasificación.

Si la terminal posee vías de recepción/expedición, pero no vías de clasificación, los trenes entrantes acceden a la zona de carga/descarga usando una vía de entrada/salida (véanse los pasos marcados en rojo en la Figura 5.6). Cuando el tren entra, se dirige hacia una vía de recepción/expedición, donde se retira la locomotora que transporta y donde espera hasta que se le asigna una vía de carga/descarga libre. Una vez hecho esto, sus plataformas son desplazadas hacia la vía de carga/descarga asignada por un tractor de maniobras. El tractor de maniobras es liberado cuando acaba esta tarea. La secuencia de operaciones para la salida de trenes es la inversa (véanse los pasos marcados en azul en la Figura 5.6): movimiento de plataformas desde las vías de carga/descarga a las vías de recepción/expedición, colocación de una locomotora, espera hasta la hora de salida del tren y salida del tren de la terminal usando una vía de entrada/salida.

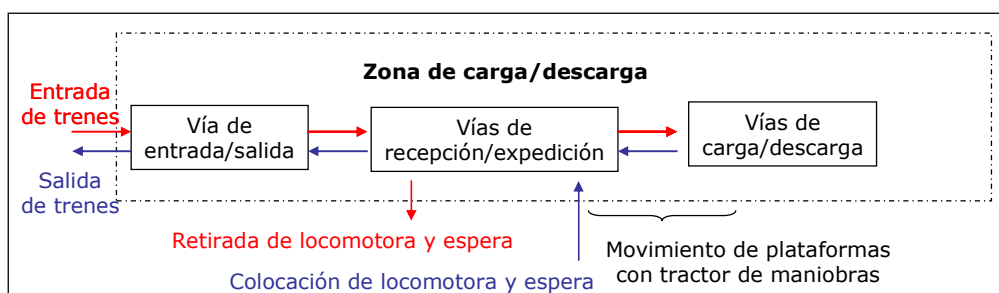


Figura 5.6. Entrada/salida de trenes en/de la zona de carga/descarga usando las vías de recepción/expedición. Fuente: elaboración propia.

Si la terminal posee vías de clasificación, pero no vías de recepción/expedición, los trenes acceden a la zona de carga/descarga usando la zona de clasificación. Según lo marcado en rojo en la Figura 5.7, el tren atraviesa la vía de entrada/salida de la zona de clasificación y se coloca en una vía de

clasificación. Tras haber retirado la locomotora que el tren transporta y haberle asignado una vía de carga/descarga, sus plataformas son desplazadas hacia la zona de carga/descarga usando un tractor de maniobras. La secuencia de operaciones para la salida de trenes es la inversa (véanse los pasos marcados en azul en la Figura 5.7).

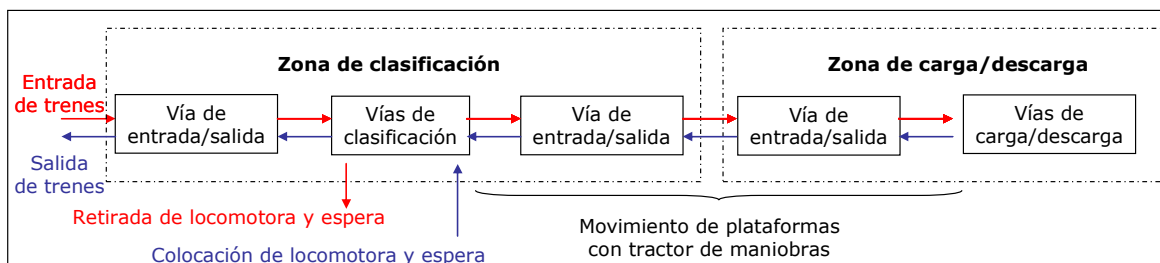


Figura 5.7. Entrada/salida de trenes en/de la zona de carga/descarga usando las vías de clasificación. Fuente: elaboración propia.

Si la terminal posee vías de recepción/expedición y vías de clasificación, los trenes pueden acceder a la zona de carga/descarga usando cualquiera de los procedimientos definidos anteriormente, según las preferencias establecidas por el usuario de la plataforma flexible de simulación como parámetro de entrada.

El proceso de entrada/salida de trenes en/de la zona de carga/descarga puede detallarse aún más al tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Según lo establecido en el apartado 5.2, la zona de carga/descarga puede atender trenes cuya longitud supera la de las vías de carga/descarga. En este caso, las plataformas de los trenes serán repartidas en varias vías, aumentando el número de vías de carga/descarga necesarias para atender un tren y el número de movimientos que realiza el tractor de maniobras entre las vías de recepción/expedición y las vías de carga/descarga, o entre las vías de clasificación y las vías de carga/descarga.
- De acuerdo con lo expuesto en el subapartado 5.3.1, la terminal a representar puede disponer de más de una playa de carga/descarga de trenes y camiones/tractores con plataforma. En este caso, cada playa estará reservada para un conjunto de trenes concreto y por tanto, sólo se buscarán vías libres dentro de la playa encargada de atender el tren entrante que se quiere colocar. Esta regla de operación es coherente con lo observado en las terminales visitadas, siendo el conjunto de trenes que cada playa puede atender un parámetro de entrada para la plataforma flexible de simulación.
- Como se indicó en el subapartado 5.3.2, las vías de entrada/salida disponibles en la zona de carga/descarga y/o en la zona de de clasificación

pueden ser únicas o dobles. Si la vía es única, no permitirá la entrada/salida de trenes de forma simultánea; mientras que, si es doble, esta operación sí será posible, al disponer de una vía especializada para cada función.

- La entrada/salida de trenes puede verse afectada si aparecen averías en los tractores de maniobras. La tasa de averías y la tasa de reparación para cada uno de estos equipos, así como para las grúas que trabajan en la terminal a estudiar (grúas móviles y/o pórtico), han sido representadas usando distribuciones empíricas de probabilidad que serán configuradas por el usuario de la plataforma flexible de simulación.

Además de los trenes indicados anteriormente, las terminales que poseen zona de clasificación también pueden recibir otros dos tipos de trenes. Por un lado, trenes que serán atendidos en la zona de clasificación, sin necesidad de pasar por la zona de carga/descarga (véase lo indicado en el subapartado 5.4.2). Por otro lado, trenes donde parte de sus plataformas serán segregadas y desplazadas hacia la zona de carga/descarga para ser atendidas, mientras que las plataformas restantes permanecen en la zona de clasificación hasta que las plataformas segregadas vuelvan a ser nuevamente incorporadas y el tren pueda salir de la terminal.

5.4.2. CLASIFICACIÓN DE PLATAFORMAS

Según lo observado en las terminales visitadas y lo indicado en la revisión bibliográfica (véase, por ejemplo, Macharis y Bontekoning, 2004; Marinov y Viegas, 2009 o Marinov y Viegas, 2011), una vez retirada la locomotora de un tren entrante, sus plataformas permanecen en las vías de clasificación a la espera de que se realice una inspección técnica y comercial sobre ellas.

Tras finalizar esta inspección (donde se comprueba si las plataformas y los contenedores transportados son los correctos y si están en perfecto estado), comienza el proceso de formación de los trenes salientes a partir de la clasificación de las plataformas transportadas por el tren entrante. Este proceso puede dividirse en dos pasos. En primer lugar, se separan los lotes de plataformas que tienen un mismo destino final. Generalmente, las plataformas con destinos homogéneos están colocadas de forma contigua dentro del tren entrante. A continuación, se utiliza un tractor de maniobras para desplazar estos lotes de plataformas hacia otras vías de clasificación, previamente reservadas para formar los nuevos trenes salientes.

Los trenes salientes pueden formarse a partir de las plataformas transportadas por uno o varios trenes entrantes (véanse los casos 1 y 2 de la Figura 5.8), o a partir de la consolidación de las plataformas transportadas por varios trenes entrantes en un único tren saliente (véase el caso 3 de la Figura 5.8).

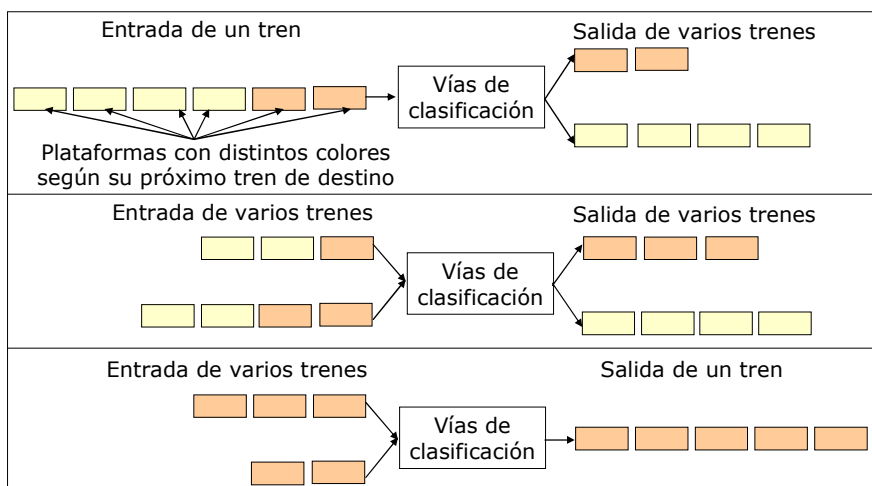


Figura 5.8. Tipo de trenes salientes formados en la zona de clasificación. Fuente: elaboración propia.

El proceso de clasificación comienza tan pronto como el tren entrante llega a la terminal. Sin embargo, la plataforma flexible de simulación permite configurar escenarios alternativos de operación donde varían:

- Los horarios empleados para realizar inspecciones, para separar lotes de plataformas y para trabajar con los distintos tractores de maniobras que operan en la terminal. Para simplificar, no se ha considerado de forma explícita al personal humano. Sin embargo, los trabajadores están relacionados implícitamente con los recursos/infraestructuras/tareas que atienden, al permitir que el usuario de la plataforma flexible pueda configurar los turnos que limitan el trabajo de: los tractores de maniobras, las grúas móviles, las grúas pórtico, las puertas de entrada/salida de camiones/tractores con plataforma, la retirada/colocación de locomotoras y el desarrollo de las inspecciones posteriores a la entrada de un tren y previas a su salida.
- La zona donde trabajan los tractores de maniobras. El usuario de la plataforma flexible pueden definir qué tractores trabajan como recurso compartido entre la zona de carga/descarga y la zona de clasificación y cuáles trabajan como recurso dedicado a una única zona.
- El número de operaciones de clasificación que pueden realizarse de forma simultánea. El usuario de la plataforma flexible pueden definir el número

máximo de trenes sobre los que se trabaja en paralelo en la zona de clasificación. La definición de este número máximo permite controlar las interferencias que puedan existir entre distintos equipos de trabajo.

Una vez formado un tren saliente, se inspecciona su composición y sus plataformas quedan a la espera de que se les coloque una locomotora y de que llegue su instante de salida de la terminal. Para evitar problemas cuando el número de trenes que entran/salen de la zona de clasificación no está equilibrado, se ha supuesto que la terminal dispone de tantas locomotoras como sea necesario para formar los trenes salientes.

Una estrategia alternativa a la clasificación de las plataformas transportadas por varios trenes entrantes para formar el mismo número de trenes salientes es el trasbordo de contenedores entre trenes. Este proceso se explicará con más detalle en el subapartado 5.4.4.

Teniendo en cuenta estos dos procesos (clasificación de plataformas y trasbordo de contenedores entre trenes), la plataforma flexible de simulación podría ser utilizada para representar terminales donde no existen operaciones de clasificación ni de trasbordo, terminales donde sólo se clasifican plataformas, terminales donde sólo se trasbordan contenedores entre trenes y terminales donde, de forma mixta, se clasifican plataformas y se trasbordan contenedores entre trenes.

5.4.3. ALMACENAMIENTO DE CONTENEDORES

En la zona de carga/descarga, los contenedores pueden intercambiarse directamente entre trenes y camiones/tractores con plataforma, aunque, en ciertos casos, deben ser almacenados en el suelo de la terminal antes de salir. Como se expuso a lo largo del capítulo 4, este tipo de almacenamiento es comúnmente utilizado en Europa y en Australia, además de ser empleado en parte de las terminales ferroviarias de Norte América.

Según lo indicado en los subapartados 5.3.1 y 5.4.1, la zona de carga/descarga puede disponer de más de una playa de carga/descarga de trenes y camiones. En este caso, cada playa estará reservada para un conjunto de trenes entrantes/salientes concreto y por tanto, sus zonas de almacenamiento sólo se utilizarán para albergar contenedores relativos a esos trenes.

Las playas de carga/descarga a simular pueden almacenar contenedores únicamente en la playa de almacenamiento (que está a unos metros de las vías de

carga/descarga), únicamente en las líneas de almacenamiento (que están junto a las vías) o, de forma mixta, en la playa de almacenamiento y en las líneas de almacenamiento. A continuación, se estudia cómo se almacenan los contenedores en cada uno de estos tres casos.

Caso 1. Uso exclusivo de la playa de almacenamiento

La playa de almacenamiento se utiliza como lugar de espera para los contenedores que llegan en camión/tractor con plataforma antes de poder ser cargados en un tren (en adelante, contenedores entrantes en la red ferroviaria) y para los contenedores que son descargados de un tren antes de que un camión/tractor con plataforma haya llegado a la terminal para retirarlos (en adelante, contenedores salientes de la red ferroviaria).

Según lo observado en las terminales ferroviarias visitadas y en las publicaciones relativas a puertos marítimos (véase, por ejemplo, Zhang et al., 2003 o Henesey et al., 2009), los contenedores con características homogéneas (por ejemplo, destino, propietario, tamaño, etc.) se almacenan de forma conjunta. En la plataforma flexible de simulación, se ha establecido que los contenedores entrantes y salientes en/de la red ferroviaria se almacenen de forma separada, siguiendo criterios diferentes. Los contenedores entrantes relativos a un mismo tren serán agrupados, mientras que los contenedores salientes pertenecientes a un mismo cliente serán colocados unos cerca de otros.

La plataforma flexible de simulación permite elegir entre dos estrategias para gestionar esta playa de almacenamiento. En la primera, los contenedores se almacenan a dos o tres alturas, según las preferencias que establezca el usuario de esta herramienta como parámetro de entrada, mientras que, en la segunda, los contenedores se almacenan preferentemente en superficie. El almacenamiento en altura permite aprovechar mejor el espacio, al apilar contenedores con un mismo tamaño (20, 30 ó 40 pies) y peso (cargado o vacío) antes de buscar un hueco en superficie. Sin embargo, esta estrategia suele incrementar el riesgo de tener que realizar dobles manipulaciones para extraer el contenedor saliente requerido por un camión/tractor con plataforma. Esta desventaja queda mitigada al almacenar contenedores en superficie, aunque la necesidad de espacio aumenta.

La Figura 5.9 muestra las ventajas/inconvenientes de cada una de estas estrategias para una playa de almacenamiento donde los contenedores se almacenan en tres filas. En este ejemplo, el espacio requerido en planta para almacenar nueve contenedores salientes de 20 pies cargados en tres alturas es

menor que el espacio empleado para almacenarlos en superficie (véase la vista en planta para cada estrategia). Por el contrario, el almacenamiento en superficie requiere mover menos contenedores que el almacenamiento en altura, si el objetivo es extraer el primer contenedor que entró en la playa (véanse los contenedores marcados en rojo en la vista lateral para cada estrategia).

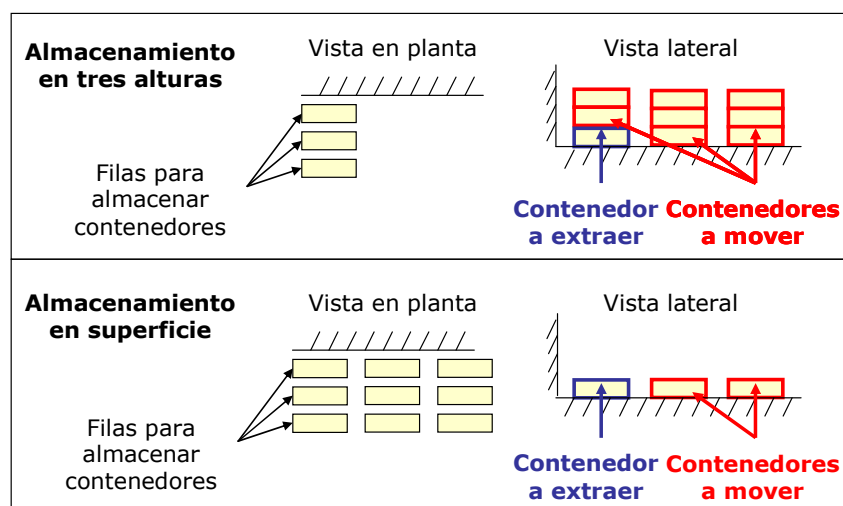


Figura 5.9. Ejemplo de almacenamiento de contenedores en altura y en superficie. Fuente: elaboración propia.

Las grúas móviles son los equipos encargados de gestionar la entrada/salida de contenedores a/de la playa de almacenamiento y de mover contenedores entre ella y otras infraestructuras de la terminal: áreas de carga/descarga de camiones/tractores con plataforma y vías de carga/descarga. En caso de existir más de una playa de carga/descarga, cada grúa móvil puede trabajar como un recurso dedicado a una única playa o como un recurso compartido entre varias playas, según las preferencias que establezca el usuario de la plataforma flexible de simulación como parámetro de entrada.

Caso 2. Uso exclusivo de las líneas de almacenamiento

En este caso, los contenedores entrantes/salientes en/de la red ferroviaria se almacenan bajo las grúas pórtico en líneas independientes situadas a uno o ambos lados de las vías de carga/descarga. En estas líneas, los contenedores con un mismo tamaño y peso pueden ser apilados hasta un máximo de dos alturas. Las grúas pórtico son los equipos encargados de gestionar esta zona de almacenamiento, moviendo contenedores entre ella, las vías de carga/descarga y el área de carga/descarga de camiones/tractores con plataforma que está bajo pórtico (véase la Figura 5.10). En caso de existir grúas móviles, éstas pueden dar apoyo a las grúas pórtico si el layout de la terminal permite su acceso a las líneas de almacenamiento. De acuerdo con lo observado en las terminales visitadas, se ha

establecido que los contenedores salientes de la red ferroviaria se coloquen lo más cerca posible de las plataformas de donde fueron descargados y que los contenedores entrantes a la red ferroviaria se coloquen lo más cerca posible de las plataformas donde vayan a ser cargados. Esta forma de operar permite reducir el movimiento de las grúas pórtico durante la carga/descarga de trenes.

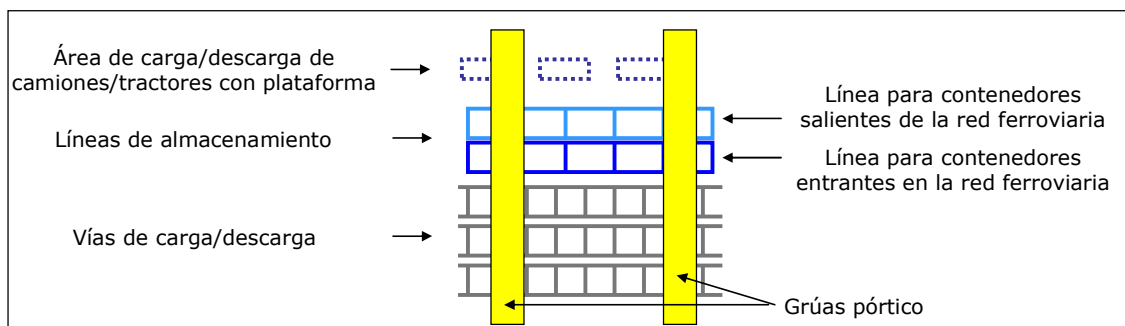


Figura 5.10. Área de trabajo de las grúas pórtico. Fuente: elaboración propia.

Si el usuario lo considera oportuno y las necesidades de almacenamiento de la terminal lo requieren, la plataforma flexible de simulación puede ser utilizada para estudiar escenarios donde el uso de las infraestructuras que están bajo pórtico varíe, haciendo, por ejemplo, que una o más vías de carga/descarga en desuso puedan ser utilizadas para almacenar contenedores. La aplicación de esta práctica, no estudiada previamente en la literatura revisada, ha sido observada, en el caso español, en terminales con altos volúmenes de trabajo.

Caso 3. Uso mixto de la playa de almacenamiento y de las líneas de almacenamiento

De acuerdo con lo observado en las terminales visitadas y lo expuesto por Rizzoli et al. (2002), se ha establecido que en caso de existir playa de almacenamiento y líneas de almacenamiento y de querer utilizar ambas zonas, los contenedores se almacenen, en primera instancia, en las líneas de almacenamiento para reducir el número de dobles manipulaciones. La playa de almacenamiento sólo se utilizará cuando no existan huecos disponibles para colocar contenedores entrantes en la red ferroviaria cerca de las vías de carga/descarga, o cuando las hileras dedicadas a almacenar contenedores salientes de la red ferroviaria alcancen un determinado porcentaje de ocupación. Este porcentaje (por ejemplo, del 80%) será fijado por el usuario de la plataforma flexible de simulación como un parámetro de entrada y al superarse, iniciará el movimiento de contenedores salientes desde las líneas de almacenamiento hasta la playa de almacenamiento, para así evitar el bloqueo de las grúas pórtico durante el proceso de descarga de trenes. Dentro de cada una de estas dos zonas de almacenamiento, los

contenedores se colocarán siguiendo las reglas de operación definidas en los casos anteriores.

En este caso, las grúas pórtico gestionan las líneas de almacenamiento, mientras que las grúas móviles atienden la playa de almacenamiento. Estas últimas grúas también pueden mover contenedores entre las distintas zonas que componen la terminal, además de gestionar las líneas de almacenamiento si disponen de acceso a ellas.

5.4.4. DESCARGA/CARGA DE TRENES Y TRABORDO DE CONTENEDORES ENTRE TRENES

Tan pronto como las plataformas de un tren entrante están en las vías de carga/descarga y existen equipos disponibles, se realiza una inspección técnica y comercial sobre ellas y se inicia el proceso de descarga de sus contenedores.

Según lo indicado en el capítulo 4, las grúas móviles sólo descargan trenes en aquellas playas de carga/descarga donde no existen grúas pórtico. En este caso, los contenedores descargados pueden ser cargados directamente sobre camiones/tractores con plataforma, que llegan a la terminal durante la descarga del tren, o pueden ser trasladados a la playa de almacenamiento (situada a unos metros de las vías), donde esperan hasta su salida de la terminal.

Si existen grúas pórtico, estos equipos serán los encargados de descargar los trenes entrantes. Según lo expuesto en el subapartado 5.3.1, la plataforma flexible de simulación permite representar playas de carga/descarga donde trabajan, como máximo, tres grúas pórtico. En caso de existir una grúa pórtico operativa, está atenderá todas las infraestructuras que están bajo pórtico: vías de carga/descarga, líneas de almacenamiento y área de carga/descarga de camiones. En caso de existir dos, se definirán áreas de trabajo iguales e independientes para cada grúa, con el objetivo de evitar choques entre ellas (véase este reparto en la Figura 5.11). La tercera grúa pórtico sólo entrará en funcionamiento si existen dos grúas pórtico operativas y una de ellas se avería. Las grúas pórtico pueden depositar los contenedores descargados sobre camiones/tractores con plataforma o cerca de las vías de carga/descarga, donde esperarán hasta su salida de la terminal o donde serán retirados por las grúas móviles para llevarlos hacia la playa de almacenamiento.

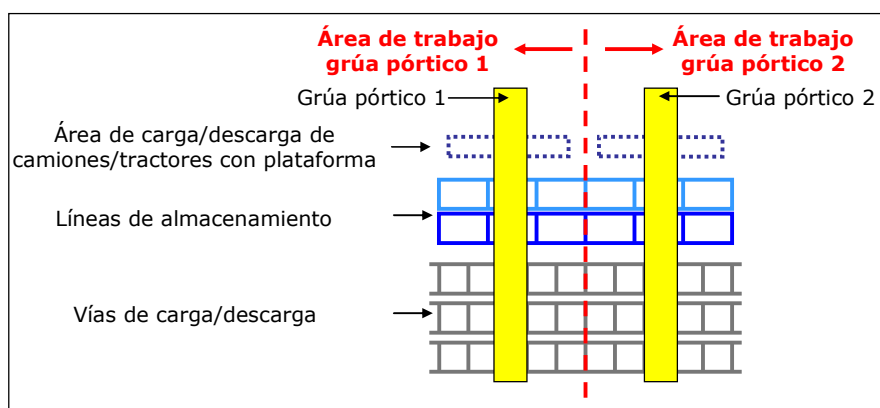


Figura 5.11. Reparto del área de trabajo entre dos grúas pórtico. Fuente: elaboración propia.

Si es necesario, las grúas pórtico pueden ser utilizadas además para trasbordar contenedores entre trenes. Los trasbordos serán directos, si la plataforma de origen está cargada con contenedores y la plataforma de destino está vacía (véanse los movimientos marcados en rojo en la Figura 5.12). Por el contrario, los trasbordos serán indirectos, si las plataformas de origen/destino están cargadas (véanse los movimientos marcados en azul en la Figura 5.12). En este último caso, el trasbordo comienza con el movimiento de los contenedores de una plataforma cargada hacia el suelo (véanse los movimientos marcados como "1" en la Figura 5.12). A continuación, se mueven los contenedores de la plataforma cargada hacia la vacía (véanse los movimientos marcados como "2" en la Figura 5.12). Por último, cuando esta última plataforma se vacía, se depositan sobre ella los contenedores que fueron colocados inicialmente en el suelo (véanse los movimientos marcados como "3" en la Figura 5.12).

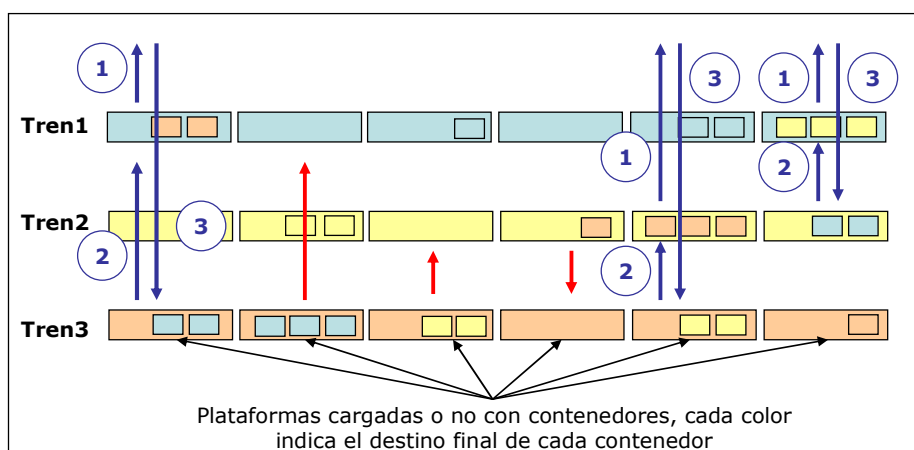


Figura 5.12. Trasbordo de contenedores entre trenes. Fuente: elaboración propia.

La plataforma flexible de simulación permite configurar trenes entrantes donde todos sus contenedores serán descargados para salir en camión/tractor con plataforma; donde todos sus contenedores serán trasbordados entre dos o más trenes; o donde parte de sus contenedores serán descargados y otra parte serán trasbordados.

Los trenes que entran/salen en/de la zona de carga/descarga están equilibrados. De tal forma que después de haber descargado las plataformas de un tren entrante, éstas pueden volver a ser cargadas antes de salir de la terminal. Esta forma de operar es coherente con lo observado en las terminales visitadas y lo expuesto en Macharis y Bontekoning (2004).

Según el tipo de la playa de carga/descarga considerada, los contenedores a cargar pueden estar en la playa de almacenamiento, en las líneas de almacenamiento o llegar a la terminal durante el proceso de carga del tren con el que están relacionados. Estos últimos sólo serán cargados si llegan un cierto tiempo antes de la salida del tren. Este tiempo indica el cierre del proceso de carga y el inicio de la preparación del tren para su salida. La carga de los trenes puede empezar tan pronto como sus plataformas estén disponibles o dentro de una ventana temporal que comienza un cierto tiempo antes de su salida de la terminal. La primera estrategia reduce, generalmente, el número de dobles manipulaciones, al maximizar el número de intercambios directos de contenedores entre trenes y camiones/tractores con plataforma; mientras que la segunda estrategia permite especializar el trabajo de las grúas según franjas horarias. La antelación respecto a la salida de los trenes con la que se inicia y se cierra su proceso de carga son parámetros de entrada a configurar por el usuario de la plataforma flexible de simulación.

Al igual que sucedía en el proceso de descarga, las grúas móviles sólo cargan trenes en aquellas playas de carga/descarga donde no existen grúas pórtico. En las configuraciones a simular, las grúas (móviles o pórtico) pueden trabajar, en paralelo, sobre varios trenes (entrantes o salientes). El intercambio directo de contenedores entre trenes y camiones/tractores con plataforma tiene prioridad frente a los movimientos indirectos tren-zona de almacenamiento y zona de almacenamiento-tren. Esta forma de operar es coherente con lo observado en las terminales visitadas y lo expuesto en Rizzoli et al. (2002). Los movimientos indirectos de contenedores (tren-zona de almacenamiento y zona de almacenamiento-tren) tienen la misma prioridad, aunque, en la medida de lo posible, se intenta agilizar la formación de aquellos trenes cuyo instante de salida es más temprano.

Una vez cargado un tren saliente, se inspecciona su composición y sus plataformas quedan a la espera de ser desplazadas, por un tractor de maniobras, hacia las vías de recepción/expedición o hacia las vías de clasificación, donde se les colocará una locomotora y donde esperarán hasta su salida de la terminal.

5.4.5. ENTRADA/SALIDA DE CAMIONES/TRACTORES CON PLATAFORMA

La plataforma flexible de simulación permite representar terminales interiores que reciben/expiden contenedores cargados en camiones y terminales ferroviarias integradas en puertos donde la entrada/salida de contenedores se realiza usando tractores con plataforma. También está permitida la entrada/salida de un flujo mixto de vehículos (camiones/tractores con plataforma) para aquellas terminales interiores que estén lo suficientemente cerca de puertos como para interactuar con ellos o para aquellas terminales ferroviarias integradas en puertos que estén conectadas con la red de carreteras.

Los camiones/tractores con plataforma llegan a la terminal para dejar un contenedor que posteriormente saldrá en un tren (en adelante, camiones/tractores con plataforma a descargar) o para recoger un contenedor que entró previamente en un tren (en adelante, camiones/tractores con plataforma a cargar).

Las llegadas y la entrada/salida de ambos tipos de vehículos se han representado de forma independiente, pero similar. En ambos casos, se ha considerado que el usuario de la plataforma flexible cuenta con información sobre el patrón llegadas de los camiones/tractores con plataforma relacionados con cada tren entrante/saliente. Este patrón se ha supuesto aleatorio y su tiempo entre llegadas se generará usando una distribución exponencial. La distribución exponencial es utilizada con frecuencia para simular procesos de llegada independientes (Law, 2007). Por ejemplo, Yun y Choi (1999), Rizzoli et al. (2002) y Corry y Kozan (2006) la emplean para generar la llegada de camiones a terminales que intercambian contenedores entre el ferrocarril y la carretera; mientras que Shabayek y Yeung (2002), Cortés et al. (2007) y Ambrosino y Tànfani (2009) la usan para generar la llegada de barcos a terminales portuarias.

La plataforma flexible de simulación permite utilizar una o dos distribuciones exponenciales para generar las llegadas de los camiones/tractores con plataforma relacionados con cada tren. El uso de dos distribuciones permite definir patrones de llegada donde la media de la distribución exponencial varía en el tiempo. De tal forma que pueda representarse, por ejemplo, un ritmo bajo de llegadas para aquellos contenedores que llegan entre uno y tres días antes de su salida en tren y un ritmo mayor para aquellos contenedores que llegan el mismo día en el que se produce la salida del tren con el que están relacionados.

Si el usuario de la plataforma flexible de simulación tiene mejores datos procedentes de la observación empírica del sistema real, también podrá usar

valores deterministas o distribuciones empíricas de probabilidad para configurar el tiempo entre llegadas de los camiones/tractores con plataforma a cargar y a descargar.

Los camiones/tractores con plataforma acceden a la terminal usando una puerta de entrada/salida, donde se inspecciona la documentación del contenedor a descargar o donde se identifica la ubicación del contenedor a cargar. Según las preferencias que indique el usuario de la plataforma flexible de simulación, como parámetro de entrada, estas puertas pueden estar dedicadas únicamente a la entrada o a la salida de vehículos o pueden ser utilizadas, como recurso compartido, para gestionar ambas operaciones. Si un camión/tractor con plataforma llega cuando todas las puertas de entrada están ocupadas, éste esperará fuera de la terminal antes de entrar.

Una vez realizadas las gestiones oportunas en la puerta de entrada, el camión/tractor con plataforma se dirige hacia el área de carga/descarga correspondiente (el subapartado 5.4.6 muestra más detalles sobre este movimiento). Si todas las posiciones de carga/descarga de ese área están ocupadas, el camión/tractor con plataforma espera en la zona de aparcamiento. Si no hay zona de aparcamiento o si ésta está ocupada hasta su máxima capacidad, el camión/tractor con plataforma no podrá entrar en la terminal.

Cuando un camión/tractor con plataforma termina de ser cargado o descargado, éste debe volver a atravesar una puerta de entrada/salida para salir de la terminal. Si todas las puertas de salida están ocupadas, el camión/tractor con plataforma esperará en la zona de aparcamiento. Si no hay zona de aparcamiento o si ésta está ocupada hasta su máxima capacidad, el camión/tractor con plataforma esperará en el área de carga/descarga donde fue atendido.

Para aquellas terminales ferroviarias integradas en puertos que no tienen puertas de entrada/salida, basta con configurar el tiempo de ciclo de este elemento con un valor igual a cero. De esta forma, la entrada/salida de camiones/tractores con plataforma se gestiona de forma ordenada e instantánea.

5.4.6. CARGA/DESCARGA DE CAMIONES/TRACTORES CON PLATAFORMA

Una vez atravesada la puerta de entrada, los camiones/tractores con plataforma entrantes se dirigen hacia la playa de carga/descarga reservada para atender el tren entrante/saliente con el que están relacionados. Como se indicó en el apartado 5.3, cada playa de carga/descarga puede disponer de dos áreas de carga/descarga de camiones/tractores con plataforma. Una estará situada cerca de

las vías de carga/descarga y estará presente en toda playa de carga/descarga a simular; mientras que la otra estará situada cerca de la playa de almacenamiento y estará sólo presente en aquellas playas de carga/descarga donde existe esta zona de espera de contenedores.

Los camiones/tractores con plataforma a cargar se colocarán cerca de donde esté el contenedor requerido. Si el contenedor está en la playa de almacenamiento, el camión/tractor con plataforma se moverá hacia el área de carga/descarga que está junto a ella, donde esperará hasta ser cargado por una grúa móvil. Si el contenedor está en las líneas de almacenamiento, el camión/tractor con plataforma se desplazará hacia el área de carga/descarga que está junto a las vías de carga/descarga para ser cargado por una grúa pórtico, o por una grúa móvil, en caso de que esta última tenga acceso al contenedor requerido. Si el contenedor está todavía cargado en un tren entrante, el camión/tractor con plataforma se dirigirá hacia el área de carga/descarga que está junto a las vías, donde esperará hasta ser cargado por una grúa móvil o pórtico, según la playa de carga/descarga que corresponda.

Si el camión/tractor con plataforma a descargar llega durante la carga del tren con el que está relacionado, éste se dirigirá hacia el área de carga/descarga que está junto a las vías. Según la playa de carga/descarga que corresponda, una grúa móvil o pórtico lo atenderá y colocará el contenedor descargado directamente sobre el tren, sin necesidad de almacenarlo previamente. Por el contrario, si el camión/tractor con plataforma a descargar llega antes de que haya comenzado la carga del tren con el que está relacionado, el contenedor será descargado y almacenado hasta su salida. Según lo expuesto en el subapartado 5.4.3, en la medida de lo posible, se dará prioridad al almacenamiento de contenedores cerca de las vías para reducir el número de dobles manipulaciones.

Las grúas móviles y pórtico darán prioridad a la atención de camiones/tractores con plataforma, siempre que esto no afecte a la salida de ningún tren. Esta regla de operación, observada en las terminales visitadas, permite reducir el tiempo de estancia de los camiones/tractores con plataforma en la terminal.

5.5. RELACIÓN DE LAS TERMINALES A REPRESENTAR CON SU ENTORNO

Según lo indicado a lo largo del apartado 5.4, la plataforma flexible de simulación necesita los siguientes datos de demanda para simular el

funcionamiento de una terminal: horarios de entrada/salida de trenes, composición de los trenes y patrones de llegadas para los camiones/tractores con plataforma a cargar/descargar.

Sin embargo, la eficiencia de una terminal no sólo depende de su funcionamiento interno, sino de las relaciones que existen entre este subsistema y el entorno con el que interactúa, pues, en ciertos casos, existen sucesos imprevistos que distorsionan la demanda y con ello, la operación de la terminal.

La plataforma flexible de simulación permite representar escenarios de demanda donde los siguientes sucesos imprevistos pueden aparecer:

- Los trenes pueden llegar a su terminal de destino antes o después de lo planificado. La probabilidad de que un tren entrante sufra un adelanto/retraso será definida por el usuario de la plataforma flexible, así como el adelanto/retraso asociado. Para representar este último valor, se ha utilizado una distribución normal truncada, de parámetros configurables. Según Law (2007), esta distribución es adecuada para representar distintos tipos de errores, como puede ser, por ejemplo, el error previsto en el instante de llegada de un tren.
- Los trenes pueden salir de su terminal de origen después de lo planificado por causas ajenas a esta terminal. Por ejemplo, un tren de contenedores puede salir con retraso para evitar interferencias con un tren de pasajeros durante la circulación de ambos por la red ferroviaria. En este caso, el usuario de la plataforma flexible también podrá definir la probabilidad de que un tren sufra un retraso y los parámetros de la distribución normal truncada, hacia valores positivos, empleada para generarlo.
- La composición de los trenes entrantes puede ser diferente de la planificada inicialmente. La probabilidad de que un contenedor no sea cargado en la terminal de origen, la probabilidad de que un tren entrante transporte más contenedores de lo planificado y el número de contenedores transportados en exceso serán definidos por el usuario de la plataforma flexible. Este último valor será configurado a través de una distribución empírica de probabilidad, así como las características de los contenedores en exceso a generar (tamaño, peso, etc.).
- La composición de los trenes salientes puede ser diferente de la planificada, si algún contenedor a cargar no llega a la terminal a pesar de tener un

servicio de transporte contratado. La probabilidad de que este suceso ocurra también será configurada por el usuario de la plataforma flexible.

- La composición de los trenes salientes también puede ser diferente de la planificada, si algún contenedor llega a la terminal después de que se haya cerrado la carga del tren con el que está relacionado. La aparición de este suceso será definida por el usuario de la plataforma flexible a partir de los patrones aleatorios empleados para establecer las llegadas de los camiones/tractores con plataforma.

5.6. INDICADORES PARA MEDIR EL FUNCIONAMIENTO DE TERMINALES

Para cada configuración simulada, la plataforma flexible de simulación proporciona resultados sobre: su productividad, el uso de sus recursos e infraestructuras, el nivel de servicio ofrecido a los trenes y a los camiones/tractores con plataforma y las incidencias que pueden surgir durante la simulación de su funcionamiento. Estos indicadores son adecuados para evaluar las decisiones estratégicas y tácticas presentadas en el apartado 3.3, además de ser coherentes con los publicados en la literatura para otros estudios de simulación con objetivos similares a los de esta tesis (véase el apartado 4.2).

Los indicadores relativos a productividad proporcionados por la plataforma flexible hacen referencia a:

- El número de trenes entrantes/salientes atendidos en cada zona de la terminal durante el tiempo de simulación.
- El número de contenedores cargados/descargados en/de los trenes.
- El número de contenedores trasbordados entre trenes.
- El número de plataformas clasificadas.
- El número de camiones/tractores con plataforma atendidos.
- El número de trasbordos directos tren-camión o tren-tractor con plataforma realizados.
- El número de operaciones (carga de camiones, descarga de camiones, etc.) realizadas por cada equipo de la terminal (grúas pórtico, grúas móviles y tractores de maniobra).

La plataforma flexible cuantifica el porcentaje de uso, respecto a su tiempo disponible o a su capacidad máxima disponible, de los siguientes recursos e infraestructuras:

- Grúas pórtico.
- Grúas móviles.
- Tractores de maniobras.
- Puertas de entrada/salida de camiones/tractores con plataforma.
- Zona de aparcamiento de camiones/tractores con plataforma.
- Áreas de carga/descarga de camiones/tractores con plataforma.
- Playas de almacenamiento.
- Líneas de almacenamiento.
- Vías de entrada/salida.
- Vías de recepción/expedición.
- Vías de carga/descarga.
- Vías de clasificación.

El nivel de servicio proporcionado a los trenes y a los camiones/tractores con plataforma durante el tiempo de simulación se mide a través de:

- El número de trenes que deben esperar fuera de la terminal antes de entrar.
- El tiempo medio y máximo asociado a la espera de trenes fuera de la terminal.
- El número de trenes que salen con retraso por falta de capacidad de la terminal.
- El retraso medio y máximo en la salida de trenes por falta de capacidad de la terminal.
- El tiempo medio dedicado a la carga/descarga de trenes y a la clasificación de sus plataformas.
- El tiempo medio y máximo de estancia para los camiones/tractores con plataforma a cargar/descargar.

- El porcentaje de camiones/tractores con plataforma cuyo tiempo de estancia supera el configurado por el usuario de la plataforma flexible como tiempo máximo deseado.
- El número medio y máximo de camiones/tractores con plataforma que esperan fuera y dentro de la terminal.
- El tiempo medio y máximo asociado a la espera de camiones/tractores con plataforma fuera y dentro de la terminal.

Por último, la plataforma flexible de simulación proporciona información sobre ciertas incidencias que pueden aparecer durante la simulación. Estas incidencias están relacionadas con la identificación de:

- El instante de tiempo en el que se bloquea la entrada de camiones/tractores con plataforma a la terminal. Esto ocurre cuando un camión/tractor con plataforma quiere entrar, pero no puede hacerlo por no existir ningún hueco libre en la zona de aparcamiento ni en las áreas de carga/descarga donde colocarlo.
- El instante de tiempo en el que se bloquea la entrada de trenes a la terminal. Esto ocurre cuando un tren quiere entrar en la terminal, pero no puede hacerlo por no existir ninguna vía libre en la zona de carga/descarga ni en la zona de clasificación donde colocarlo.
- El instante de tiempo en el que sale un tren cuyo instante de salida planificado se ha sobrepasado por falta de capacidad de la terminal.
- El número de contenedores que no llegan a ser cargados en un determinado tren por llegar a la terminal después haberse cerrado su proceso de carga.
- El período de tiempo durante el cual los equipos de la terminal (grúas móviles, grúas pórtico y tractores de maniobras) están averiados.

De acuerdo con lo presentado en el capítulo 4, el funcionamiento de las configuraciones simuladas será considerado como adecuado si sus recursos e infraestructuras disponibles se ajustan a la carga de trabajo existente y si todos los trenes salen según el horario planificado. El nivel de servicio proporcionado a los camiones/tractores con plataforma es más difícil de valorar, ya que depende, entre otros factores, del volumen de trabajo que las terminales manejan en cada momento y de la disponibilidad de sus recursos e infraestructuras. En ausencia de datos más precisos, se considerarán como aceptables aquellas configuraciones

donde el tiempo máximo de estancia para, al menos, el 95% de los camiones/tractores con plataforma sea igual o inferior a los 20 ó 30 minutos considerados como valor máximo por Ballis et al. (1997) y por Ballis y Golias (2002) en sus estudios de simulación relativos a terminales de transporte intermodal.

Capítulo 6

IMPLEMENTACIÓN DE LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN

6.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo, que se enmarca dentro de la tercera fase de la metodología descrita en el apartado 3.5 (“Diseño, desarrollo y experimentación con la plataforma flexible de simulación”), recoge la implementación informática de la plataforma flexible presentada en esta tesis a partir del modelo conceptual expuesto en el capítulo 5.

Para llevar a cabo esta implementación, ha sido necesaria una primera fase de diseño y análisis, donde: se han definido los elementos que componen la plataforma flexible de simulación (véase el apartado 6.2), se ha decidido qué software utilizar para implementar cada uno de ellos (véase el apartado 6.3) y se han desarrollado distintos prototipos para validar la bondad de los softwares elegidos y para determinar la viabilidad de construir una plataforma flexible capaz de configurar ciertos aspectos de diseño y de operación de una terminal ferroviaria de contenedores que aparecían fijos en otras herramientas de simulación encontradas en la literatura (véase el apartado 6.4).

Después de tratar esta primera fase de diseño y análisis, se explica cómo se ha programado la plataforma flexible de simulación (véanse los apartados 6.5 y 6.6) y cuáles son los pasos a seguir para ponerla en funcionamiento (véase el apartado 6.7).

6.2. ELEMENTOS DE LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN

Al igual que el resto de plataformas flexibles de simulación encontradas en la literatura (véase el apartado 4.2.1), la plataforma flexible desarrollada en esta tesis está compuesta por dos elementos básicos: un modelo de simulación y una interfaz de usuario. El modelo de simulación representa, de forma genérica, los elementos y el funcionamiento de las terminales ferroviarias de contenedores expuestas a lo largo del capítulo 5, mientras que la interfaz de usuario permite particularizar sus características de diseño (funciones, tipo de recursos y de infraestructuras, otras características de diseño relativas a los recursos y a las infraestructuras y layout) y sus características de operación (reglas de operación, horarios para la prestación de servicios y demanda).

La plataforma flexible desarrollada en esta tesis dispone, además, de dos ficheros donde se recogen los resultados del modelo de simulación. En uno de estos ficheros, se agrupan los valores numéricos relativos a los indicadores definidos en

el apartado 5.6 para medir el nivel de servicio, la productividad y el uso de los recursos y de las infraestructuras de las terminales a simular. En el otro fichero, se describen las incidencias que aparecen a lo largo de la simulación. Según lo expuesto en el apartado 5.6, estas incidencias pueden hacer referencia, por ejemplo, al período de tiempo durante el cual un equipo concreto está averiado o al número de contenedores que no fueron cargados en un determinado tren saliente por llegar a la terminal después del cierre de su proceso de carga.

6.3. ELECCIÓN DE SOFTWARES

Una vez identificados los elementos que componen la plataforma flexible de simulación (modelo de simulación, interfaz de usuario y ficheros de resultados), la siguiente decisión a tomar consiste en elegir el software que se utilizará para implementarlos.

6.3.1. ELECCIÓN DE SOFTWARE PARA EL MODELO DE SIMULACIÓN

El modelo de simulación presentado en esta tesis se ha basado en simulación de eventos discretos, ya que, según lo identificado en los apartados 3.4 y 4.2, es el tipo de simulación más utilizado para estudiar terminales ferroviarias de contenedores.

En el mercado, existen distintos softwares para desarrollar modelos de simulación de eventos discretos (véase, por ejemplo, los recogidos en Khoshnevis, 1994; Banks et al., 2001; Robinson, 2004; Kelton, 2007 y Law, 2007). Estos softwares pueden clasificarse en cuatro grupos:

- Hojas de cálculo, como las de Microsoft Excel. Las hojas de cálculo suelen ser fáciles de utilizar y proporcionan buenos resultados para desarrollar modelos de simulación sencillos. Ante problemas complejos, suele ser necesario utilizar softwares más potentes, ya que la programación puede complicarse, por ejemplo, al requerir el uso de macros.
- Lenguajes de propósito general, como FORTRAN o C. Los lenguajes de propósito general son baratos y proporcionan gran flexibilidad para modelar diversos sistemas reales (sencillos o complejos). Sin embargo, suelen ser difíciles de utilizar, al requerir, por lo general, gran cantidad de tiempo y de esfuerzo para construir un modelo.
- Lenguajes de simulación, como SIMSCRIPT o SIMAN. Los lenguajes de simulación incorporan ciertas herramientas (como, por ejemplo,

generadores de números aleatorios o mecanismos para gestionar una lista de eventos) que reducen el tiempo de desarrollo de un modelo. Suelen ser menos versátiles que los lenguajes de propósito general, aunque son capaces de simular un conjunto muy diverso de sistemas reales.

- Entornos de simulación, como Arena o Witness. La mayoría de estos entornos permite construir y ejecutar modelos de simulación complejos de una forma interactiva, lo que reduce su tiempo de desarrollo. Generalmente, los entornos de simulación proporcionan un conjunto predefinido de elementos entre los que un usuario puede elegir para construir diversos modelos de simulación. Las características y la representación gráfica de cada elemento, así como la lógica que los relaciona, se define a través de menús o cuadros de diálogo. Por contra, los entornos de simulación suelen tener un coste superior al de las hojas de cálculo, los lenguajes de propósito general o los lenguajes de simulación, además de estar diseñados para aplicaciones específicas (por ejemplo, simulación de sistemas productivos o simulación de redes de comunicaciones), lo que reduce su capacidad para representar sistemas reales muy dispares.

En esta tesis, se ha utilizado el software Witness PwE 2.00b (en adelante Witness) para implementar el modelo de simulación. Witness es un entorno de simulación comercial diseñado para modelar sistemas diversos (fábricas, centros de llamadas, hospitales, etc.). La elección de este entorno viene justificada por las siguientes razones:

- Witness ofrece más facilidades que las hojas de cálculos, los lenguajes de propósito general o los lenguajes de simulación para representar, con suficiente nivel de detalle, terminales ferroviarias de contenedores. Además, el área donde trabaja la autora de esta tesis dispone de una licencia para utilizarlo.
- Dentro de la línea de investigación donde se enmarca esta tesis, existen experiencias previas donde se ha utilizado Witness para modelar terminales aisladas y redes de transporte intermodal (véase García Gutiérrez, 2001; García y Gutiérrez, 2003; Marín Martínez et al., 2004 y García Sánchez et al., 2006).
- En la literatura, se han encontrado experiencias donde Witness también ha respondido bien a la hora de simular otras terminales de contenedores (véase, por ejemplo, Shabayek y Yeung, 2002; Parola y Sciomachen, 2005;

Hou et al., 2006; Ha y Wang, 2008; Zhang y Jiang, 2008 y Cartenì y de Luca, 2012).

- En el subapartado 4.2.1, se han identificado softwares diseñados específicamente para simular dos familias concretas de terminales: terminales ferroviarias dedicadas a clasificar plataformas (véase Klima et al., 2001; Adamko y Marton, 2008 y Lin y Cheng, 2009) y terminales portuarias de contenedores (véase Chesscon, 2012; Flexsim CT, 2012 y Trafalquar, 2012). Sin embargo, no se han encontrado evidencias que indiquen su capacidad para modelar, de una forma más rápida y sencilla que con Witness, otras terminales que escapen de su rango de aplicación, como es el caso del conjunto de nodos considerado como objeto de estudio en esta tesis (esto es, terminales capaces de intercambiar contenedores entre trenes y camiones/tractores con plataforma, y de combinar esta función con el trasbordo de contenedores entre trenes y/o con la clasificación de plataformas).

6.3.2. ELECCIÓN DE SOFTWARE PARA LA INTERFAZ DE USUARIO

No todas las plataformas flexibles de simulación encontradas en la literatura utilizan el mismo tipo de interfaz de usuario. Por ejemplo, Kulick y Sawyer (1999) utilizan una base de datos, Kulick y Sawyer (2001) usan una hoja de cálculo, mientras que Benna y Gronalt (2008) emplean un módulo de entrada de datos basado en cuadros de diálogo.

Conocidas estas alternativas, se estableció la necesidad de analizar qué interfaz podía ser la más adecuada para la plataforma flexible de simulación presentada en esta tesis. Para realizar este análisis, se siguió la secuencia de pasos que se describe a continuación.

En primer lugar, se evaluó si Witness era capaz de interactuar con otras aplicaciones (hojas de cálculo y/o bases de datos) para recuperar datos previamente configurados en ellas y si, además, permitía crear cuadros de diálogo para recabar datos que pudieran ser utilizados en un modelo de simulación. Tras comprobar que ambas alternativas eran viables, se definieron tres posibles interfaces de usuario basadas, al igual que en las plataformas flexibles encontradas en la literatura, en el uso de: bases de datos, cuadros de diálogo y hojas de cálculo. Después, se definieron las características que la interfaz finalmente elegida debía poseer. En este caso, estas características hacen referencia a: facilidad de uso, facilidad de implementación, garantía de integridad y validez de los datos

introducidos, y capacidad para guardar los datos previamente configurados. A continuación, se utilizaron estas características para evaluar cada interfaz. Los resultados de este estudio se recogen en la Tabla 6.1, donde las casillas marcadas en color rojo indican que la interfaz mostrada en columnas no presenta valores satisfactorios para la característica mostrada en filas, las casillas naranjas sugieren que la interfaz mostrada en columnas presenta valores medios para la característica mostrada en filas, mientras que las casillas verdes revelan que la interfaz mostrada en columnas presenta valores aceptables para la característica mostrada en filas.













	Bases de datos	Cuadros de diálogo	Hojas de cálculo
Facilidad de uso			
Facilidad de implementación			
Integridad y validez de los datos introducidos			
Capacidad para guardar los datos introducidos			

Tabla 6.1. Evaluación de interfaces de usuario. Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se utilizó la información recogida en la Tabla 6.1 para comparar alternativas y para descartar aquellas que presentaran algún inconveniente. En primer lugar, se descartó el uso de bases de datos por parecer más difíciles de utilizar y de implementar que los cuadros de diálogo o las hojas de cálculo. Generalmente, es más frecuente encontrar usuarios familiarizados con el uso de cuadros de diálogo u hojas de cálculo que con el uso de bases de datos. Además, las bases de datos suelen ser bastante complejas de implementar, al tener que crear, por un lado, una estructura de tablas donde se almacenan los datos introducidos por el usuario y, por otro, uno o varios formularios que recogen indicaciones para cumplimentar estas tablas (por ejemplo, líneas de texto para explicar las unidades de medida de un determinado dato de entrada o para explicar su rango de variación). En segundo lugar, se desechó el uso de cuadros de diálogo, por parecer más difíciles de implementar que las hojas de cálculo. Para crear un cuadro de diálogo en Witness es necesario programar, entre otros aspectos, su área, las indicaciones que facilitan su cumplimentación, las casillas donde se introducen los datos y los botones que permiten pasar de un cuadro de diálogo a otro; mientras que una hoja cálculo presenta un entorno de trabajo predefinido donde se pueden recoger datos numéricos o alfanuméricos de forma instantánea. Otra desventaja de los cuadros de diálogo frente a las hojas de cálculo es que no permiten guardar los datos configurados por un usuario, lo que, por ejemplo, puede

incrementar el tiempo de estudio de un escenario de mejora de una terminal, al no poder reutilizar parte de los datos de entrada configurados en el escenario de partida. Este estudio llevó finalmente a elegir el uso de hojas de cálculo como interfaz de usuario, al presentar valores aceptables para cada una de las características recogidas en la Tabla 6.1.

Por último y tras elegir el uso de hojas de cálculo como interfaz de usuario, se decidió utilizar Microsoft Excel para implementarlas. La elección de este software viene motivada por su capacidad para crear hojas de cálculo robustas, por el alto número de usuarios que están familiarizados con él y por la existencia de experiencias anteriores, fuera del ámbito de estudio de esta tesis, en su aplicación para configurar modelos de simulación programados en Witness (véase, por ejemplo, el uso que se daba inicialmente a este software en García Sánchez, 2007 para la programación del transporte de hidrocarburos por oleoducto).

6.3.3. ELECCIÓN DE SOFTWARE PARA LOS FICHEROS DE RESULTADOS

Los resultados que se obtienen tras simular un escenario pueden presentarse de varias formas. En Witness, los resultados pueden mostrarse a través de cuadros de diálogo propios de esta aplicación o pueden ser exportados a otras aplicaciones. En esta tesis, los resultados se han exportado a otras aplicaciones, ya que esta alternativa facilita, entre otros aspectos, su posterior tratamiento estadístico.

Entre las distintas aplicaciones con las que puede interactuar Witness (bases de datos, hojas de cálculo, documentos de texto, etc.), se ha decidido utilizar:

- Una hoja de cálculo (compatible con Microsoft Excel) para volcar los valores numéricos de los indicadores recogidos en el apartado 5.6.
- Un documento de texto (compatible con Microsoft Word) para recopilar las incidencias que pueden aparecer a lo largo de la simulación.

La elección de estas interfaces de salida de resultados es coherente con la naturaleza de los datos almacenados en cada una de ellas, mientras que la elección de los softwares utilizados para implementarlas viene justificada por el alto número de usuarios que están familiarizados tanto con Microsoft Excel como con Microsoft Word.

6.4. PROTOTIPOS DE LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN

En sus inicios, el proceso de implementación de la plataforma flexible de simulación estuvo marcado por las fuentes de incertidumbre que se exponen a continuación:

- No se conocía la capacidad de Witness para adaptar las características de una terminal ferroviaria de contenedores modelada de forma genérica a las especificaciones definidas por un usuario en una interfaz, ya que ninguna de las plataformas flexibles estudiadas en el subapartado 4.2.1 utiliza Witness como entorno de simulación.
- Estaba por demostrar la posibilidad de crear plataformas flexibles de simulación donde un usuario pudiera modificar las funciones de una terminal, el tipo de recursos y de infraestructuras que trabajan en ella y sus reglas de operación, ya que las plataformas flexibles estudiadas en el subapartado 4.2.1 sólo permiten simular terminales donde pueden variar uno o varios de los siguientes aspectos: características de diseño relativas al tipo de recursos y de infraestructuras existentes (número, capacidad, etc.), layout, horarios para la prestación de servicios y demanda.
- Estaba por verificar la posibilidad de desarrollar plataformas flexibles de simulación que permitieran representar los elementos y/o los procesos de una terminal con un nivel de detalle suficiente como para poder apoyar el estudio de terminales y de decisiones estratégicas y tácticas no analizadas previamente en la literatura. Según lo expuesto a lo largo del apartado 4.2, un ejemplo de terminal no representada en la literatura sería aquella que posee una zona de carga/descarga y una zona de clasificación, mientras que un ejemplo de decisión no analizada en la literatura sería estudiar qué efecto tiene, sobre el funcionamiento de una terminal, la llegada/salida de trenes con una longitud superior a la de sus vías de carga/descarga.

La identificación de estas tres fuentes de incertidumbre motivó que la implementación de la plataforma flexible de simulación se hiciera de forma incremental, comenzando con la creación de distintos prototipos que permitieran probar, de forma parcial, la viabilidad de su desarrollo.

El primer prototipo creado de la plataforma flexible de simulación tenía por objetivo determinar la viabilidad de los softwares elegidos en el apartado 6.3.

Este primer prototipo estaba compuesto, al igual que la plataforma flexible de simulación finalmente desarrollada en esta tesis, por dos elementos básicos: un modelo de simulación programado en Witness y una interfaz de usuario creada en Microsoft Excel. El modelo de simulación representaba los elementos y el funcionamiento de uno de los tipos de terminales ferroviarias expuesto a lo largo del capítulo 5, mientras que la interfaz de usuario permitía particularizar parte de sus características de diseño y de operación.

Las terminales representadas en este primer prototipo operaban en el interior de una red ferroviaria, disponían de una zona de carga/descarga dedicada al almacenamiento de contenedores y al intercambio de contenedores entre trenes y camiones, poseían un único haz de vías de carga/descarga y eran atendidas por grúas móviles y pórtico. Estas terminales fueron elegidas frente al resto de nodos presentados en el capítulo 5 por dos motivos. En primer lugar, porque presentaban un buen equilibrio entre: variedad de características a representar (lo que justifica el enfoque flexible de simulación) y aspectos comunes (lo que facilita una implementación rápida del prototipo). En segundo lugar, fueron elegidas porque existía la posibilidad de tener acceso a datos reales para representar y estudiar estos nodos, al haber sido ampliamente estudiadas en la literatura y al presentar elementos y procesos comunes con los existentes en la terminal ferroviaria de contenedores de Madrid Abroñigal (terminal, gestionada por ADIF, con mayor posibilidad de ser visitada por su cercanía a la universidad donde se ha desarrollado esta tesis).

Los procesos simulados en este primer prototipo fueron representados con menor nivel de detalle que los definidos en el apartado 5.5, por ejemplo, no se podía trabajar con trenes cuya longitud superara la de las vías de carga/descarga ni se sabía la ubicación exacta de los contenedores dentro de la playa de almacenamiento. Del mismo modo, el prototipo sólo permitía configurar terminales donde variaban parte de las características de diseño y de operación citadas en el subapartado 3.3.2. Estas simplificaciones vienen motivadas porque no se pretendía construir un prototipo con las mismas funcionalidades que la plataforma flexible final, sino construir un prototipo que pudiera servir como herramienta para verificar, de forma rápida, si el uso de Witness y de Microsoft Excel era adecuado para crear una plataforma flexible capaz de configurar características similares a las encontradas en otras plataformas flexibles de simulación (número de vías, longitud de las vías, etc.), además de otras características de diseño relativas a sus recursos e infraestructuras identificadas tras haber estudiado, en detalle, las terminales a simular. Entre estas nuevas características a configurar, puede encontrarse, por

ejemplo, el número de líneas de almacenamiento o el número máximo de camiones que pueden ser cargados/descargados cerca de las vías.

Una descripción más detallada de este primer prototipo puede encontrarse en García y García (2009), donde, además, se presenta un caso de estudio que evidencia la capacidad del modelo de simulación para representar una terminal particular a partir de la información definida por un usuario en la interfaz Excel. Este caso de estudio también refleja la capacidad de la plataforma flexible para evaluar el funcionamiento de la terminal representada según los indicadores recogidos en el apartado 5.6.

Los resultados de este primer trabajo sirvieron como punto de partida para extender el enfoque flexible de simulación a otros niveles. Por ejemplo, en posteriores prototipos, se modificó la programación de la plataforma flexible inicial para simular:

- Terminales que pudieran trabajar sin grúas móviles, sin playa de almacenamiento o sin líneas de almacenamiento. Este nuevo grado de flexibilidad, no considerado previamente en las plataformas flexibles revisadas en el subapartado 4.2.1, permitió simular terminales donde el tipo de grúas y/o el tipo de zonas de almacenamiento podía variar.
- Terminales donde sus puertas de entrada/salida de camiones/tractores con plataforma pudieran operar con dos trabajadores (uno, dedicado a la entrada de vehículos y otro, a su salida) o con un único trabajador (encargado de ambas operaciones). Este nuevo grado de flexibilidad, que aparece reflejado en los casos de estudio recogidos en una de las publicaciones que se derivan de esta tesis (véase García-Hernández y García-Gutiérrez, 2012), permitió demostrar la posibilidad de crear una plataforma flexible capaz de simular terminales con diferentes reglas de operación para un determinado elemento.

Del mismo modo, en otro prototipo posterior (véase García y García, 2012), se aumentó el nivel de detalle de los procesos modelados en García y García (2009) y en García-Hernández y García-Gutiérrez (2012), permitiendo que las terminales representadas pudieran tener una zona de clasificación para intercambiar plataformas entre trenes o para romper trenes largos que no podían ser procesados en las vías de carga/descarga. Este nuevo grado de flexibilidad permitió crear una plataforma flexible capaz de configurar terminales que combinaban dos funciones

(carga/descarga y clasificación) no estudiadas, con anterioridad, de forma conjunta en la literatura revisada.

Después de comprobar que los softwares elegidos en el apartado 6.3 eran adecuados para desarrollar plataformas flexibles de simulación y que estas herramientas eran capaces de configurar ciertas características que aparecían fijas en las plataformas flexibles estudiadas en el subapartado 4.2.1, además de ser capaces de apoyar, con suficiente nivel de detalle, el estudio de terminales y de decisiones no analizadas previamente en la literatura revisada, se dio paso a la implementación de la plataforma flexible presentada en esta tesis.

En este punto, se identificó que la complejidad de implementar la plataforma flexible radicaba en el desarrollo del modelo de simulación. Por analogía con los prototipos creados anteriormente, la programación del modelo de simulación parecía una tarea compleja y costosa debido al alto número de terminales que se querían representar/estudiar con él. Del mismo modo, la modificación posterior de alguna de sus partes (para acercarlo aún más al funcionamiento de un sistema real) o su ampliación futura (para representar una terminal no considerada en el alcance de esta tesis) parecía entrañar un gran trabajo.

Por estas razones, se decidió desarrollar un conjunto de módulos que permitieran representar las zonas de una terminal que variaban de unos sistemas reales a otros, de tal forma que la creación de modelos y su modificación/ampliación futura pudieran realizarse de forma sencilla.

Al igual que en otras plataformas flexibles encontradas en la literatura (véase, por ejemplo, Kulick y Sawyer, 1999 o Huang et al., 2008), todos los módulos creados estarían cargados en el modelo de simulación de partida, de tal forma que un usuario no tuviera que programarlos, ni introducir código alguno para relacionarlos entre sí ni para vincularlos con la interfaz de usuario ni con los ficheros de salida de resultados. Sin embargo, a diferencia de lo encontrado en la literatura, en esta tesis, no sería necesario utilizar todos los módulos creados para representar una terminal. Por tanto, los módulos de esta tesis deberían ser capaces de ser activados/desactivados según el tipo de terminal que se quisiera estudiar.

Para probar la viabilidad de este enfoque de programación, se retomó el prototipo de plataforma flexible utilizado en García y García (2012), con el objetivo de crear un módulo que agrupara los elementos correspondientes a la zona de clasificación. Este módulo se programó para que pudiera funcionar de forma independiente de la zona de carga/descarga, así como para que pudiera ser

activado (para recibir/expedir trenes) o desactivado (para no intervenir en la simulación, si la terminal simulada no poseía zona de clasificación).

Tras comprobar que la creación de módulos y su posterior activación/desactivación era viable en Witness, se realizó un estudio detallado de las terminales consideradas en el capítulo 5 con el fin de definir los elementos y los módulos que sería necesario crear para representarlas. En base a este estudio, se programó el modelo de simulación y la interfaz de usuario que componen la plataforma flexible de simulación presentada en esta tesis. Los apartados 6.5 y 6.6 proporcionan más detalles sobre la programación de ambos elementos.

6.5. PROGRAMACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

A lo largo de los siguientes subapartados, se explica: cómo se construyen modelos de simulación usando Witness (subapartado 6.5.1), cuáles son los elementos y los módulos que componen el modelo de simulación desarrollado en esta tesis (subapartado 6.5.2), cómo se configuran las características de los elementos que componen el modelo de simulación a partir de la interfaz de usuario (subapartado 6.5.3) y cómo se ha programado la lógica que relaciona los distintos elementos y módulos del modelo (subapartado 6.5.4).

6.5.1. CONSTRUCCIÓN DE MODELOS USANDO WITNESS

Witness es un entorno de simulación de la compañía Lanner que ha sido utilizado, desde hace más de una década, en diversas aplicaciones: programación de recursos, planificación de inversiones, reorganización de redes de oficinas, mejora del servicio al cliente, mejora de procesos, planificación de centros de llamadas, planificación de redes, mejora de la distribución en planta de diversos sistemas productivos, etc.

Witness posee un conjunto de elementos parametrizables que relacionados entre sí, mediante una lógica adecuada, permiten representar el funcionamiento del sistema real considerado como objeto de estudio.

Estos elementos parametrizables pueden clasificarse en cinco categorías (Witness, 2004):

- Elementos discretos, como los elementos “part”, “buffer” o “machine”, que se utilizan para representar componentes tangibles de un proceso discreto.

- Elementos "power & free", como los elementos "network", "section" o "station", que están diseñados específicamente para modelar sistemas de transporte.
- Elementos continuos, como los elementos "fluid", "tank" o "pipe", que permiten representar procesos continuos.
- Elementos lógicos, como los elementos "attribute", "variable" o "file", que pueden ser utilizados para recoger datos del modelo, personalizar informes o influir en la lógica que vincula a los elementos de un modelo de simulación.
- Elementos gráficos, como los elementos "pie chart", "timeserie" o "histogram", que pueden ser empleados para representar gráficamente las salidas del modelo mientras que éste se ejecuta.

El modelo de simulación de esta tesis ha sido desarrollado usando elementos parametrizables de tipo discreto y lógico. A continuación, se recoge una lista con: el nombre de cada uno de los elementos empleados, una abreviatura que indica su carácter discreto o lógico (e.d. para los elementos discretos y e.l. para los elementos lógicos) y su función.

- "Part" (e.d.): hacen referencia a entidades físicas que serán procesadas por otros elementos del modelo.
- "Buffer" (e.d.): corresponden con lugares donde los elementos "part" esperan o donde son almacenados.
- "Machine" (e.d.): son capaces de coger elementos "part", procesarlos durante un determinado tiempo de ciclo y enviarlos hacia otro elemento del modelo. Los elementos "machine" pueden ser de diversos tipos según el número de elementos "part" que entran y salen de ellos. Por ejemplo, en un elemento "machine" de tipo "single", entra y sale un único elemento "part"; mientras que, en un elemento "machine" de tipo "assembly", entran varios elementos "part" y sale un único elemento "part". La operación de un elemento "machine" puede venir condicionada por la disponibilidad de uno o varios recursos (elementos "labor") y/o por la existencia de un turno (elemento "shift") que limite su trabajo. Además, los elementos "machine" permiten modelar preparaciones, averías o múltiples ciclos para completar una operación.
- "Labor" (e.d.): son recursos materiales o humanos que pueden ser requeridos por un elemento "machine" para procesar uno a varios elementos

"part" o para realizar operaciones de preparación y/o de reparación sobre este elemento. La disponibilidad de los elementos "labor" puede venir limitada por un turno de trabajo (elemento "shift").

- "Path" (e.d.): permiten el movimiento de elementos "part" y "labor" entre otros elementos del modelo (por ejemplo, entre un elemento "machine" y un elemento "buffer").
- "Module" (e.d.): son capaces de agrupar varios elementos. Pueden utilizarse como una caja negra (donde los elementos "part" entran y consumen un determinado tiempo de ciclo antes de salir hacia otro elemento o módulo del modelo) o como una caja blanca (donde el proceso representado en el módulo aparece detallado, de tal forma que los elementos "part" van pasando por los distintos elementos que componen el módulo, desde un elemento de entrada hasta un elemento de salida que lo conecta con el siguiente elemento o módulo del modelo). Witness permite crear elementos "module" dentro de otros elementos "module", con el objetivo de estructurar los elementos de un modelo de forma jerárquica.
- "Attribute" (e.l.): representan características de un elemento "part" o "labor". Los valores de un elemento "attribute" puede venir representados por un número entero, un número real, una cadena de caracteres o un nombre relativo a uno de los elementos del modelo de simulación.
- "Variable" (e.l.): permiten almacenar un único valor o un conjunto de valores de forma vectorial o matricial. De manera análoga a lo que definido para los elementos "attribute", existen distintos tipos de elementos "variable" según el tipo de datos que pueden acumular: enteros, reales, cadenas de caracteres o nombres de otros elementos del modelo. Witness permite crear elementos "variable" a nivel local (para usarlos dentro del cuadro de detalle de un determinado elemento del modelo) o a nivel global (para utilizarlos dentro del cuadro de detalle de cualquier elemento del modelo).
- "File" (e.l.): pueden actuar como archivos de lectura (permitiendo importar, al modelo de simulación, una determinada característica de un elemento) o como archivos de escritura (para exportar ciertos valores del modelo).
- "Distribution" (e.l.): permiten introducir aleatoriedad en un modelo. Los usuarios de Witness pueden trabajar con distribuciones teóricas de

probabilidad (distribución exponencial, distribución normal truncada, etc.), además de poder crear distribuciones empíricas de tipo discreto y continuo.

- “Function” (e.l.): devuelven una salida tras ejecutar una lista de instrucciones definida por un usuario. Witness permite crear elementos “function”, con o sin parámetros de entrada, capaces de devolver: valores enteros, valores reales, cadenas de caracteres o el nombre de otros elementos del modelo.
- “Shift” (e.l.): permiten crear turnos de trabajo compuestos por varios períodos de trabajo y de descanso. Estos turnos pueden ser utilizados, por ejemplo, para limitar el tiempo disponible de un elemento “machine” o de un elemento “labor”.

Además de los elementos parametrizables definidos anteriormente, Witness tiene ya creados otros elementos que no pueden ser modificados por los usuarios de este entorno, pero que son de gran utilidad para establecer la lógica del modelo de simulación. A lo largo del desarrollo del modelo de simulación de esta tesis se han utilizado elementos no parametrizables que representan:

- Lugares. Por ejemplo, el elemento “WORLD” hace referencia al lugar específico donde se encuentran los elementos “part” que entran por primera vez en un modelo, mientras que el elemento “SHIP” indica un posible lugar donde pueden ser enviados los elementos “part” procesados, por ejemplo, por un elementos “machine”.
- Variables. Por ejemplo, “N” es una variable de tipo entero que permite almacenar el índice de un elemento (por ejemplo, de un elemento “machine”) definido en cantidad mayor que 1, mientras que “TIME” es una variable real que acumula el tiempo transcurrido desde el inicio de la simulación hasta el instante en el que se evalúa.
- Funciones. Por ejemplo, la función “NPARTS(element_name)” devuelve un valor entero que corresponde con el número de elementos “part” que contiene el elemento de nombre “element_name”, mientras que la función “ISTATE(element_name)” devuelve un valor entero que hace referencia al estado (por ejemplo, ocupado o libre) del elemento de nombre “element_name”.

En Witness, los modelos de simulación se construyen siguiendo tres pasos: definición de los elementos parametrizables que van a formar parte del modelo de

simulación, configuración del detalle de estos elementos y modificación de su representación gráfica.

Definición de elementos

Witness dispone de una ventana donde se encuentran, repartidos en varias pestañas, los elementos parametrizables presentados anteriormente (elementos "part", elementos "buffer", etc.). Estos elementos se denominan elementos de diseñador. Para definir los elementos que van a formar parte de un modelo de simulación, hay que escoger, de forma progresiva, los elementos de diseñador necesarios para representar el sistema a simular y llevarlos desde la ventana de elementos de diseñador a la ventana de simulación, como indica la Figura 6.1.



Figura 6.1. Definición de elementos en Witness. Fuente: elaboración propia.

Configuración del detalle de los elementos

Para que los elementos creados funcionen correctamente, es necesario configurar su detalle. Esta operación permite establecer las características de cada elemento, además de fijar la lógica que los relaciona con el resto de elementos del modelo.

La Figura 6.2 muestra el cuadro de diálogo empleado para configurar el detalle de un elemento "machine". Concretamente, la Figura 6.2 muestra las distintas pestañas que permiten definir el detalle de las puertas de salida de camiones/tractores de maniobra. En la pestaña "General", puede configurarse: el nombre del elemento "machine" (bajo el campo "Name"), la cantidad de elementos del mismo tipo que existen (bajo el campo "Quantity"), la prioridad que este elemento tiene para obtener un elemento "labor" (bajo el campo "Priority") y el tipo de elemento "machine" del que se trata (bajo el campo "Type").

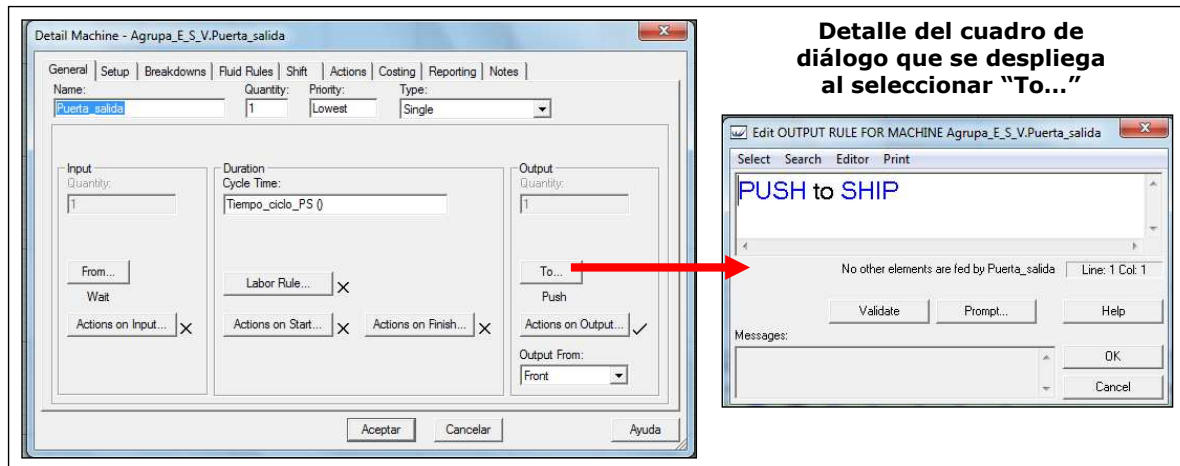


Figura 6.2. Cuadro de detalle de un elemento "machine". Fuente: elaboración propia.

La parte inferior de la pestaña "General" está dividida en tres bloques (véase la Figura 6.2). Los bloques "Input" y "Output" permiten desplegar cuadros de diálogo, donde pueden escribirse líneas de código para determinar el lugar de donde se cogen los elementos "part" a procesar y el lugar donde se envían los elementos "part" ya procesados. En el bloque central ("Duration"), se define el tiempo de operación de cada puerta de salida y si alguna precisa de elementos "labor" para operar. El código introducido en cada uno de estos bloques permite relacionar el elemento "machine" a detallar con otros elementos creados previamente por el usuario (como, por ejemplo, con el elemento "Tiempo_ciclo_PS" que aparece en el bloque "Duration" de la Figura 6.2) o con otros elementos predefinidos por Witness (como, por ejemplo, con el elemento "SHIP" que está presente en el detalle del "Output" situado a la derecha de la Figura 6.2).

Además de la pestaña "General", recogida en la Figura 6.2, existen otras pestañas ("Setup", "Breakdowns", etc.) donde pueden configurarse, entre otros aspectos, la tasa de averías, la tasa de reparación o el turno de trabajo que condicionan la operación de las puertas de salida.

Una de las principales ventajas que proporciona el modelo de simulación presentado en esta tesis frente a otros encontrados en la literatura reside en su capacidad para adaptar gran parte del detalle de sus elementos a las especificaciones dadas, como datos de entrada, por un usuario; de tal forma que no sea necesario cambiar la programación del modelo para representar un nuevo escenario donde, por ejemplo, el número de elementos de un mismo tipo, sus turnos de trabajo o sus reglas de operación varíen. En el apartado 6.5.3, se explica, con más detalle, cómo se ha llegado a alcanzar esta cualidad a partir de la conexión del modelo de simulación con la interfaz de usuario.

Modificación de la representación gráfica de los elementos

Por último, Witness permite modificar la apariencia (o el “display”) que poseen los elementos representados gráficamente en un modelo de simulación. La representación gráfica no es estrictamente necesaria para el correcto funcionamiento del modelo, sin embargo, es de gran utilidad, desde el punto de vista del programador, para verificar el modelo de simulación y, desde el punto de vista del usuario final, para entender los elementos y los procesos simulados.

La Figura 6.3 muestra cómo aparecían representadas inicialmente las puertas de salida en el modelo de simulación, junto a un menú desplegable donde se recoge una lista de aspectos que pueden ser modificados para acercar la representación gráfica de este elemento a la que puede tener una puerta de salida en una terminal real.

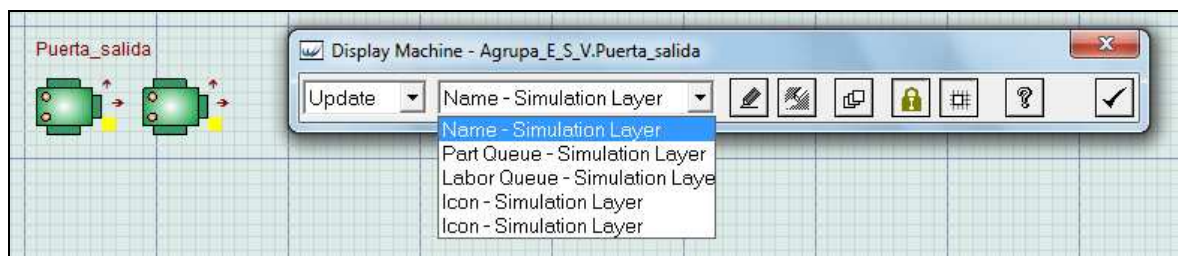


Figura 6.3. Representación gráfica inicial del elemento “Puerta_salida”. Fuente: elaboración propia.

La parte central de la Figura 6.4 muestra la representación dada finalmente a las puertas de salida en el modelo. Esta nueva representación muestra el nombre del elemento junto a tres íconos por cada una de las dos puertas de salida existentes. Los cuadrados marcados en amarillo y verde representan la vista en planta de las puertas de salida. Estos cuadrados cambian de color a lo largo de la simulación para representar lo que está haciendo cada una de las puertas simuladas. Los otros dos íconos también cambian a lo largo de la simulación, permitiendo representar gráficamente el tipo de vehículo que está siendo atendido por cada puerta en cada momento. De esta forma, observando la representación gráfica del modelo para el instante de tiempo que muestra la Figura 6.4, puede decirse que una de las dos puertas existentes está libre (“Waiting Parts”, según el código de colores que aparece en la parte derecha de la Figura 6.4); mientras que la otra está ocupada (“Busy”, según el código de colores que aparece en la parte derecha de la Figura 6.4) atendiendo a un camión a cargar. En el modelo de simulación, los camiones y los tractores con plataforma son elementos “part” que aparecen representados por los íconos que se muestran en la parte izquierda de la Figura 6.4.

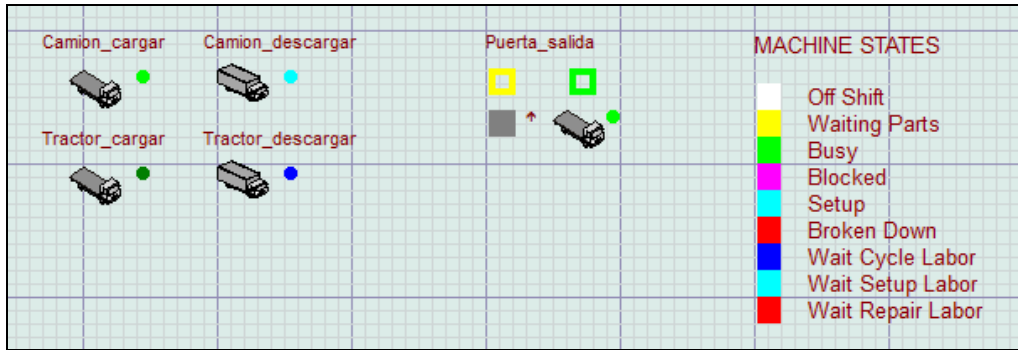


Figura 6.4. Representación gráfica final del elemento "Puerta_salida". Fuente: elaboración propia.

6.5.2. ELEMENTOS Y MÓDULOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN

Según se expuso en el apartado 6.4, la conceptualización de las terminales a representar (capítulo 5) es el punto de partida para definir los elementos que componen el modelo de simulación desarrollado en esta tesis.

De acuerdo con esta conceptualización, se han definido ocho elementos "part" para representar los contenedores, las plataformas, los camiones a cargar, los camiones a descargar, los tractores con plataforma a cargar, los tractores con plataforma a descargar, los trenes entrantes y los trenes salientes que serán manipulados al simular el funcionamiento de una terminal. Además, se han creado diversos elementos "attribute" que recogen las características de cada uno de estos elementos. Por ejemplo, para cada contenedor, se sabe el tren entrante/saliente con el que está relacionado, su tamaño (20, 30 ó 40 pies), su peso (cargado/vacío) y su próximo destino (camión, tractor con plataforma o tren).

El modelo de simulación dispone de otros elementos encargados de representar el resto de elementos físicos que componen una terminal, así como la lógica necesaria para simular la llegada de los elementos "part" al modelo, su tratamiento posterior (esperas, movimientos, etc.) y su salida tras haberlos procesados. Parte de estos elementos han sido agrupados en módulos.

Según Pidd y Castro (1999), los módulos deben ser contruidos en base a dos principios: localidad (toda la información relativa a una decisión de diseño debe estar contenida en un mismo módulo) y encapsulación (debe ser posible modificar la información de un módulo independientemente del resto de elementos o módulos que componen el modelo de simulación).

Siguiendo estas indicaciones, se han definido tres tipos de módulos que, según su existencia o no, modifican enormemente el diseño del sistema a representar:

- Módulo de clasificación. Este módulo contiene los elementos discretos y lógicos (elementos “buffer”, elementos “machine”, elementos “variable”, etc.) necesarios para representar las vías de entrada/salida y las vías de clasificación existentes en la zona de clasificación de una terminal. Además, posee otros elementos discretos y lógicos utilizados para generar las llegadas de los trenes que entran en esta zona y para gobernar los procesos de entrada/salida de trenes y de clasificación de plataformas según lo recogido en el capítulo 5.
- Módulo de carga/descarga sin grúas pórtico. Este módulo dispone de diversos elementos discretos y lógicos empleados para representar los siguientes elementos físicos: una vía de carga/descarga, una playa de almacenamiento donde se colocan los contenedores relativos a los trenes que serán atendidos en la vía anterior y dos áreas de carga/descarga de vehículos (una situada en las proximidades de la playa de almacenamiento y otra situada en las proximidades de la vía de carga/descarga). Al igual que en el módulo de clasificación, se han creado otros elementos discretos y lógicos para modelar el almacenamiento de contenedores, la carga/descarga de trenes y la carga/descarga de camiones/tractores con plataforma.
- Módulo de carga/descarga con grúas pórtico. Del mismo modo que en módulos anteriores, este módulo integra los elementos discretos y lógicos necesarios para representar los elementos físicos que posee una playa de carga/descarga con grúas pórtico genérica (vías de carga/descarga, playa de almacenamiento, líneas de almacenamiento, áreas de carga/descarga de vehículos y grúas pórtico), así como su funcionamiento (almacenamiento de contenedores, carga/descarga de trenes, trasbordo de contenedores entre trenes y carga/descarga de camiones/tractores con plataforma).

Todas las terminales ferroviarias españolas y la mayor parte de las terminales ferroviarias europeas y australianas conceptualizadas en el capítulo 5 pueden ser representadas usando, como máximo, un módulo de clasificación, cuatro módulos de carga/descarga sin grúas pórtico y tres módulos de carga/descarga con grúas pórtico. Es por esto que el número de módulos implementados en el modelo de simulación haya sido el indicado anteriormente.

Según lo indicado en el apartado 6.4, el modelo de simulación tiene cargados todos estos módulos, de tal forma que el usuario de la plataforma flexible no tenga que programarlos, ni introducir código alguno para relacionarlos entre sí ni para vincularlos con la interfaz de usuario ni con los ficheros de salida de

resultados. Adicionalmente, estos módulos pueden ser activados (de tal forma que el proceso representado en su interior aparezca detallado y los elementos "part" vayan pasando por los elementos que lo componen, desde un elemento de entrada hasta un elemento de salida del módulo) o pueden ser desactivados (de tal forma que sus elementos sean sustituidos por un tiempo de ciclo igual a cero, si no es necesaria su intervención). La activación de los módulos se realiza a través de su cuadro de detalle. En este cuadro, que aparece representado en la Figura 6.5, debe cambiarse la opción de "Cycle Time" por la opción "Elements". Para desactivarlos, debe realizarse la operación inversa, definiendo además que el campo "Cycle Time:" sea cero.

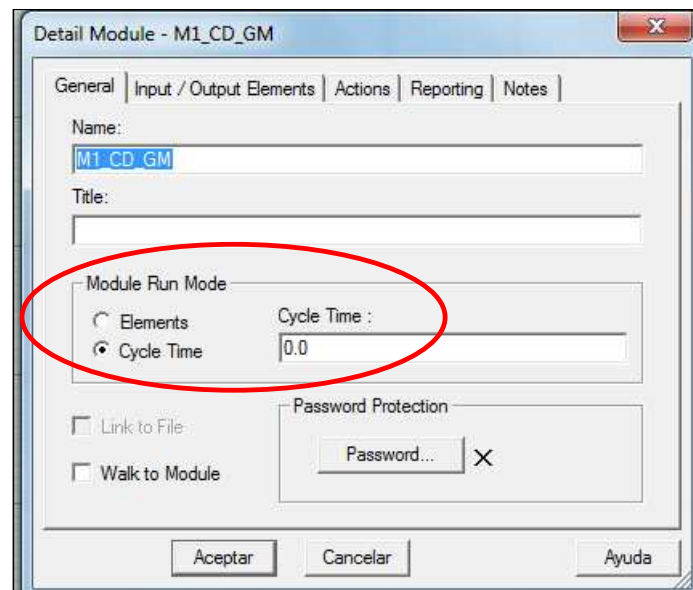


Figura 6.5. Activación y desactivación de módulos. Fuente: elaboración propia.

Activando/desactivando módulos, el modelo de simulación puede simular terminales con o sin zona de clasificación y playas de carga/descarga compuestas por:

- Uno o dos módulos de carga/descarga sin grúas pórtico. Por ejemplo, si un usuario deseara simular la terminal italiana de Pescara Porta Nuova (véase su layout en la Figura 6.6), debería configurar el modelo de simulación para que un único módulo de carga/descarga sin grúas pórtico permaneciera activo; mientras que si deseara simular la terminal austriaca de Bludenz CCT o la terminal española de El Higerón, debería activar dos módulos, como aparece en la Figura 6.6.

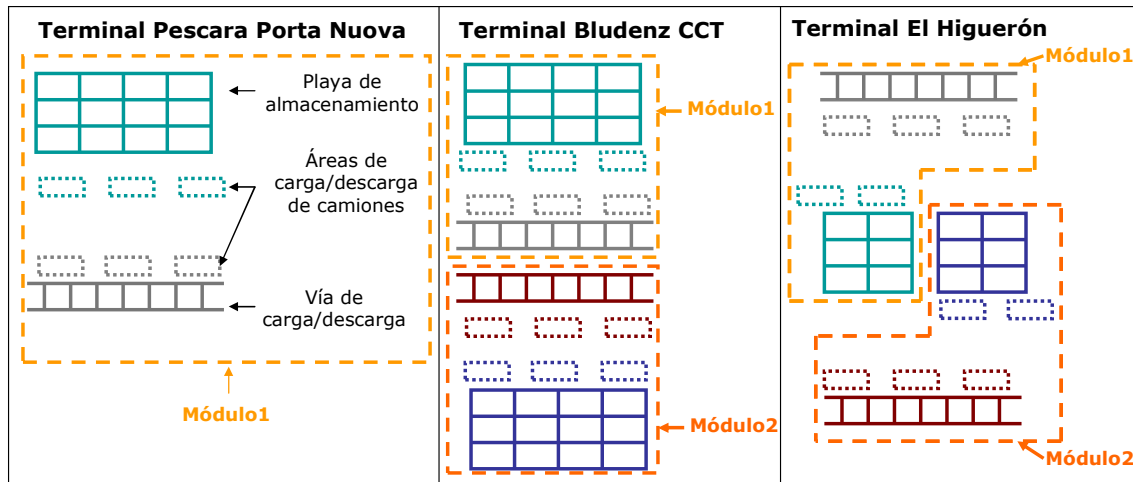


Figura 6.6. Uso de módulos para representar playas de carga/descarga sin grúas pórtico.
Fuente: elaboración propia basada en ADIF (2012c), AGORA (2012) y Terminali Italia (2012).

- Uno, dos o tres módulos de carga/descarga con grúas pórtico. Por ejemplo, si un usuario quisiera simular la terminal polaca de Gdynia (véase su layout en la Figura 6.7), debería activar un módulo de carga/descarga con grúas pórtico; mientras que si quisiera simular la terminal española de Tarragona Constanti (véase su layout también en la Figura 6.7), debería activar dos módulos. Diseños con tres haces de vías bajo pórtico (como el encontrado, por ejemplo, en la terminal española de Barcelona Morrot) deberían ser representados usando tres módulos.

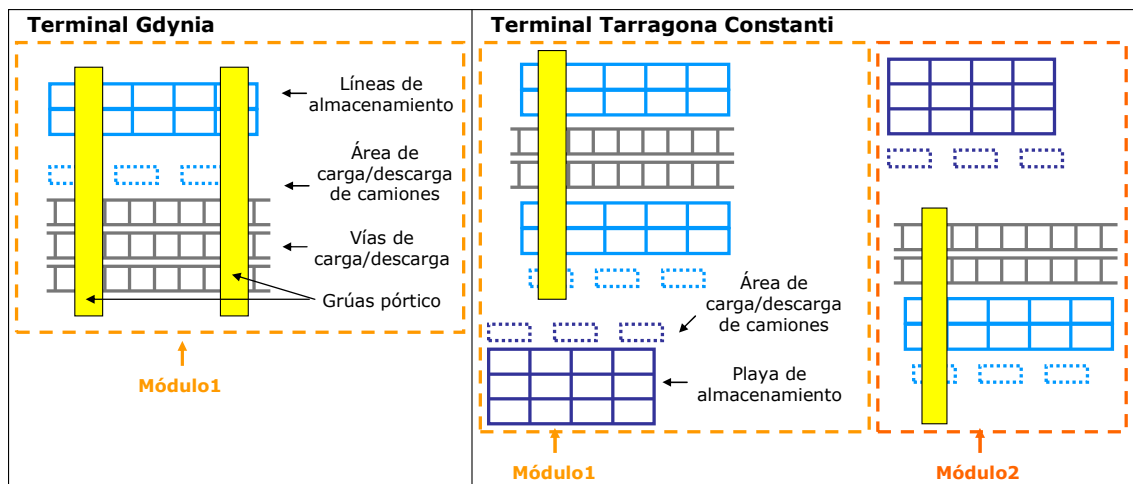


Figura 6.7. Uso de módulos para representar playas de carga/descarga con grúas pórtico.
Fuente: elaboración propia basada en ADIF (2012c) y AGORA (2012).

- Varios módulos de carga/descarga con y sin grúas pórtico. Por ejemplo, la Figura 6.8 muestra el uso de un módulo de carga/descarga con grúas pórtico y de dos módulos de carga/descarga sin grúas pórtico para representar la terminal alemana de Bremen-Roland. Otras terminales pueden requerir un número mayor de módulos para representar su playa de carga/descarga. Éste es el caso, por ejemplo, de la terminal española de

Madrid Abroñigal (que necesitaría cuatro módulos de carga/descarga sin grúas pórtico y un módulo de carga/descarga con grúas pórtico) o de la terminal española de Silla Mercancías (que necesitaría tres módulos de carga/descarga sin grúas pórtico y dos módulos de carga/descarga con grúas pórtico).

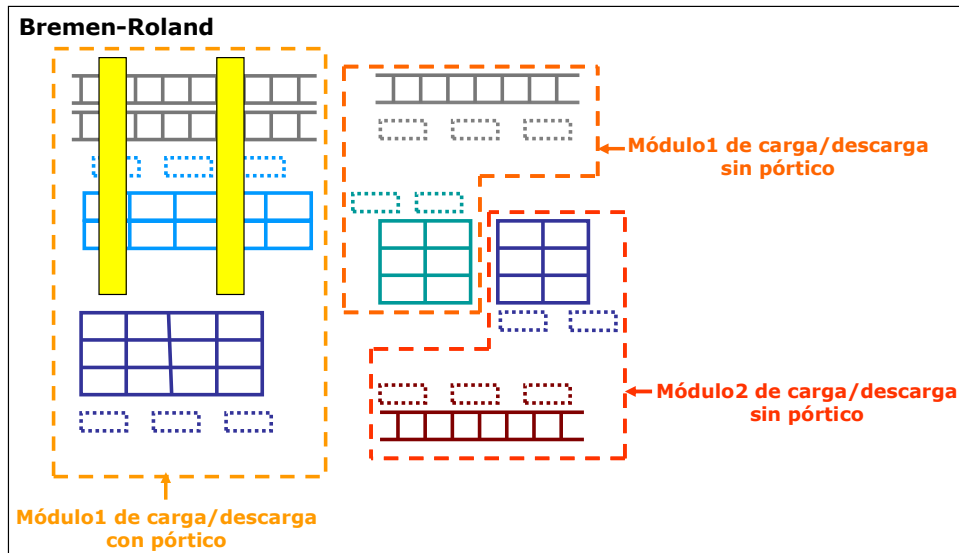


Figura 6.8. Uso de módulos para representar playas de carga/descarga con y sin grúas pórtico. Fuente: elaboración propia basada en AGORA (2012).

La creación de estos módulos ha permitido flexibilizar la estructura interna del modelo de simulación, lo que, a su vez:

- Facilita la programación del modelo de simulación, gracias a la capacidad que Witness tiene para crear nuevos módulos a partir de la clonación de otros módulos programados previamente. Al clonar un módulo, se obtiene otro con los mismos elementos, detalles y representación gráfica que el primero. Esta propiedad ha sido de gran utilidad para representar los cuatro módulos de carga/descarga sin grúas pórtico y los tres módulos de carga/descarga con grúas pórtico que el modelo de simulación posee; ya que una vez creado el primer módulo de cada tipo, éste puede replicarse tantas veces como sea necesario. Para que los nuevos módulos funcionen correctamente, sólo es necesario: revincular los elementos del nuevo módulo con la interfaz de usuario (para que las características de los elementos que lo componen sean las correctas) y redefinir la lógica que relaciona al nuevo módulo con los elementos que les envían "parts". El código restante no sería necesario modificarlo.
- Hace casi inmediata la ampliación del número de módulos que componen el modelo de simulación para representar otros diseños de playa de

carga/descarga menos frecuentes y por tanto, no considerados en el alcance de esta tesis. Éste puede ser, por ejemplo, el caso de los diseños observados en AGORA (2012) y en Terminali Italia (2012) para las terminales ferroviarias de contenedores de Bologna Interporto y de Brescia Scalo, donde parece que es necesario utilizar más de cuatro módulos de carga/descarga sin grúas pórtico para representar y estudiar cada nodo.

- Favorece la incorporación de módulos nuevos que combinados con los elementos existentes permitan representar terminales no consideradas en el alcance de esta tesis, como, por ejemplo, aquéllas que se encargan de trabajar con plataformas bimodales en la zona de carga/descarga.

Además de estos módulos, el modelo de simulación posee otros elementos discretos y lógicos encargados de representar los elementos físicos y el funcionamiento de otras zonas que suelen estar presentes en toda terminal con zona de carga/descarga, independientemente de que ésta tenga o no zona de clasificación y/o de que disponga de un tipo u otro de playa de carga/descarga. Estos elementos hacen referencia a:

- La zona de entrada/salida de camiones/tractores con plataforma. Esta zona está compuesta por diversos elementos encargados de representar los elementos físicos (puertas de entrada/salida de vehículos y zonas de aparcamiento situadas antes y después de estas puertas) y los procesos (llegada de vehículos a la terminal, entrada de vehículos en el módulo de carga/descarga correspondiente y posterior salida de vehículos de la terminal) presentes en el sistema real en esta zona.
- La zona de entrada/salida de trenes a/de la zona de carga/descarga. Al igual que en el caso anterior, se han creado elementos que permiten representar: los elementos físicos (vías de entrada/salida y vías expedición/recepción) y los procesos (llegada de trenes, entrada de trenes en el módulo de carga/descarga correspondiente y salida de trenes de esta zona) presentes en el sistema real en esta zona.
- Las zonas donde esperan las grúas móviles y los tractores de maniobra hasta ser requeridos para realizar un trabajo. Estas zonas integran los elementos "labor" definidos, en Witness, para representar estos recursos, junto a otros elementos lógicos que condicionan su operación: turnos de trabajo (representados por elementos "shift"), tasas de averías (modeladas por elementos "distribution"), etc. Las grúas móviles y los tractores de

maniobra pueden trabajar en distintos módulos, según lo configurado por el usuario de la plataforma flexible en la interfaz de usuario. De ahí que no se hayan programado dentro de ninguno de ellos. Por ejemplo, según lo definido en el capítulo 5, puede haber grúas móviles que trabajen sobre uno o varios haces de vías de carga/descarga. Del mismo modo, pueden existir tractores de maniobra encargados de trabajar en la zona de carga/descarga y en la zona de clasificación o sólo en una de estas zonas.

Además de los elementos indicados anteriormente, el modelo de simulación dispone de diversos elementos lógicos encargados de recoger los resultados que se obtienen tras la simulación de un escenario. En esta línea, se han creado:

- Varios elementos “variable”, que permiten almacenar resultados numéricos, como, por ejemplo, el número total de trenes que salen con retraso por falta de capacidad de la terminal a simular. Los valores de estos elementos son volcados, de forma automática, a un fichero compatible con Microsoft Excel cuando termina la simulación.
- Un elemento “file”, que se utiliza para exportar, a un documento de texto compatible con Microsoft Word, las incidencias que pueden surgir a lo largo de la simulación. Por ejemplo, este fichero de escritura puede ser utilizado para identificar, concretamente, qué trenes salieron con retraso y cuándo se produjo su salida de la terminal.

6.5.3. CONFIGURACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS DEL MODELO

Gran parte de la información recogida en el cuadro de detalle de los elementos que componen el modelo de simulación ha sido expresada de forma parametrizable, de tal forma que pueda ser configurada a partir de la interfaz de usuario, con el objetivo de representar las distintas alternativas de diseño y de operación recogidas en el capítulo 5, sin necesidad de cambiar la programación del modelo de simulación.

La Figura 6.9 muestra cómo se configura el número de grúas móviles disponibles en el modelo de simulación. En la parte izquierda de la Figura 6.9, aparece el cuadro de detalle del elemento “labor” utilizado para representar este recurso, junto al código programado, en la pestaña “Actions”, para cambiar su número. El número de grúas móviles depende, a su vez, del valor que toma un elemento “variable”, de nombre “Numero_grua_movil”. Según se indica en la parte

derecha de la Figura 6.9, este elemento “variable” toma valores, al inicio de la simulación, del fichero Excel “Nombre_fichero” (hoja “Zona_CD_GM”, celda “G27”).

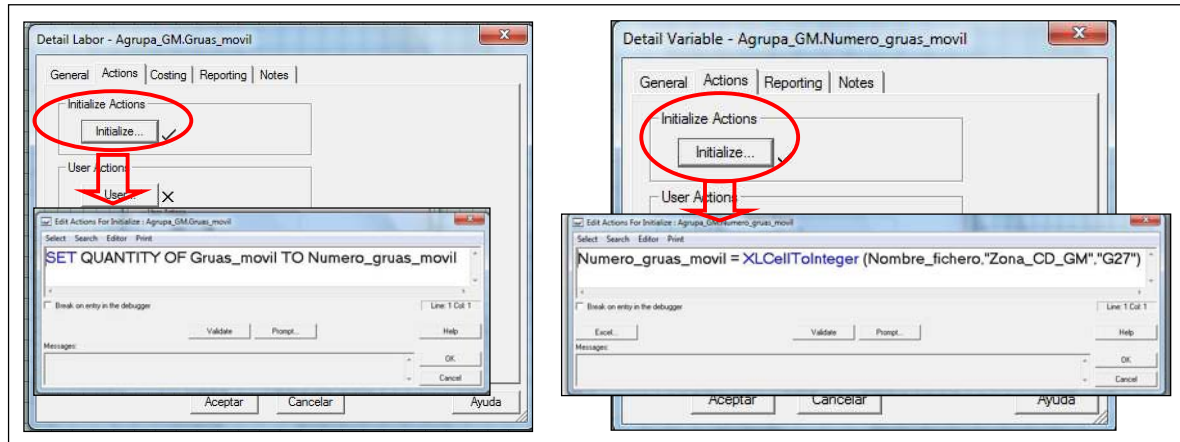


Figura 6.9. Configuración del número de grúas móviles. Fuentes: elaboración propia.

“Nombre_fichero” es un elemento “variable” que recoge el nombre del fichero Excel donde se almacenan las características de la terminal a simular. El nombre de este fichero debe ser configurado por el usuario antes de ejecutar la simulación (véase un ejemplo de configuración en la Figura 6.10).

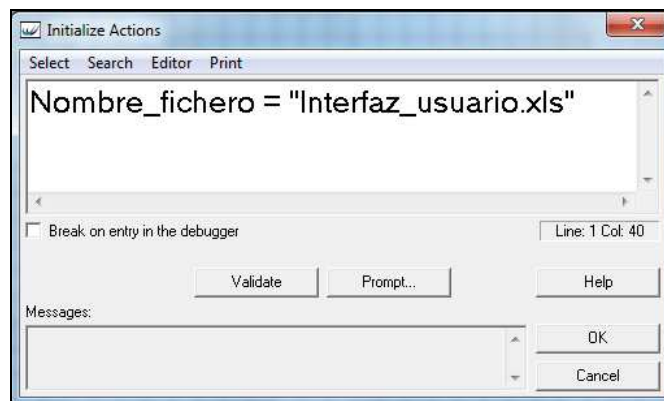


Figura 6.10. Configuración del nombre de la interfaz de usuario. Fuente: elaboración propia.

En el modelo de simulación, se han creado otros elementos “variable” que toman valores del fichero Excel “Nombre_fichero”. Estos elementos recogen información sobre:

- Las funciones de la terminal a simular: necesidad de que las grúas pórtico trasborden contenedores entre trenes para satisfacer la demanda, etc.
- El tipo de recursos y de infraestructuras disponibles: grúas pórtico, vías de recepción/expedición, playas de almacenamiento, líneas de almacenamiento, etc.
- Otras características de diseño relativas a los recursos y a las infraestructuras disponibles: número de grúas pórtico, número de vías de

recepción/expedición, largo y ancho de una playa de almacenamiento, número de líneas de almacenamiento, etc.

- El layout de la terminal: distancias que separan a los distintos elementos de la terminal, ubicación de las líneas de almacenamiento, etc.
- La demanda que atiende la terminal: instante de llegada de los trenes entrantes, composición de estos trenes, número de camiones a generar, etc.
- Las reglas seguidas por la terminal para operar: almacenamiento preferente en altura, número máximo de alturas de apilamiento, etc.

Estos elementos "variable" se utilizan para configurar el detalle de otros elementos (por ejemplo, la capacidad de los elementos "buffer" que han sido creados para representar las playas de almacenamiento) o la lógica del modelo (por ejemplo, haciendo que los elementos "machine" que simulan la colocación de contenedores en las playas almacenamiento den prioridad a su disposición en altura frente a su disposición en superficie).

Para configurar el detalle de los elementos "shift" (empleados para definir los turnos de trabajo) y el detalle de los elementos "distribution" (usados para modelar distribuciones empíricas), no se han utilizado elementos "variable". En este caso, la configuración se ha realizado a través de un conjunto de ficheros previamente creados a partir de la interfaz de usuario. La Figura 6.11 muestra un ejemplo donde aparece el código implementado para relacionar el turno de trabajo de una grúa móvil (elemento "L_V_GM1") y su tasa de averías (elemento "Tasa_averia_GM1") con los ficheros "Horario_GruaMovil1_L_a_V.sft" y "Tasa_averia_GM1.dst" que recogen las especificaciones dadas por el usuario para estas características.

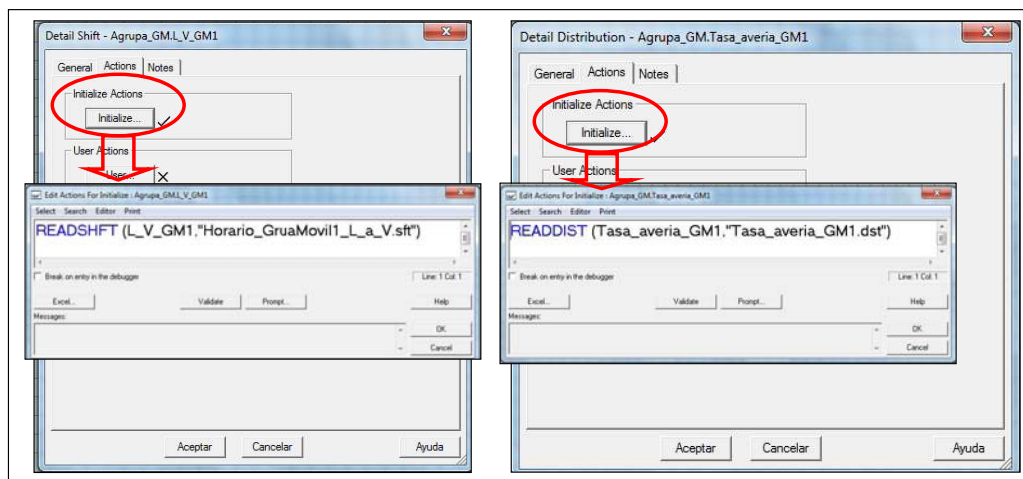


Figura 6.11. Configuración de turnos de trabajo y tasas de averías. Fuente: elaboración propia.

6.5.4. LÓGICA QUE RELACIONA LOS ELEMENTOS Y MÓDULOS DEL MODELO

En este subapartado, se resume la lógica que permite relacionar los principales elementos y módulos definidos en el subapartado 6.5.2.

Lógica para la entrada/salida de vehículos

Cuando los camiones/tractores con plataforma se generan, se asignan valores a sus elementos "attribute" (en adelante, atributos), a partir de lo configurado en la interfaz de usuario. Estos atributos permiten identificar, entre otros aspectos, cuál es el tren con el que está relacionado cada uno de los vehículos que entran en la terminal.

A su vez, cada uno de los módulos de carga/descarga dispone de diversos elementos "variable" (en adelante, variables), que almacenan información procedente de la interfaz de usuario y relativa a los trenes entrantes/salientes que van a ser atendidos en sus vías.

Los elementos que representan las puertas de entrada se encargan de comparar los atributos y las variables mencionadas anteriormente, para identificar a qué módulo debe ser enviado cada uno de los vehículos entrantes.

Después de haber cargado/descargado un vehículo, éste es enviado desde el módulo de carga/descarga correspondiente a una puerta de salida, desde donde sale del modelo.

Lógica para la entrada/salida de trenes

Cuando los trenes entrantes son generados, también se asignan valores a sus atributos, a partir de lo configurado en la interfaz de usuario. Estos atributos hacen referencia, entre otros aspectos, a su origen, destino, propietario, tipo (cliente/multicliente) y zona de entrada en la terminal.

A partir de este último atributo, el modelo de simulación es capaz de saber qué trenes entrantes deben acceder a la zona de carga/descarga y cuáles a la zona de clasificación.

En la zona de carga/descarga, los elementos que representan la vía de entrada se encargan de comparar los atributos de los trenes entrantes con las variables que recogen información sobre los trenes atendidos por cada módulo de carga/descarga, con el objetivo de identificar a qué módulo debe ser enviado cada uno de los trenes.

Cuando un tren sale de la zona de carga/descarga, éste es enviado a la vía de salida, donde se evalúan otros atributos que indican si el tren debe salir del modelo o debe dirigirse a la zona de clasificación.

Del mismo modo, cuando un tren sale de la zona de clasificación, se evalúan unos atributos que permiten determinar si éste debe salir del modelo o dirigirse a la zona de carga/descarga.

Lógica para gestionar las zonas de trabajo de las grúas móviles

En el modelo de simulación, se ha creado una variable que recoge información, previamente almacenada en la interfaz de usuario, sobre las zonas de trabajo de las grúas móviles. Esta variable posee cinco filas (una por cada una de las grúas móviles que puede tener como máximo la terminal a simular) y siete columnas (una por cada uno de los módulos de carga/descarga que pueden existir como máximo en la terminal a simular).

La Figura 6.12 muestra los valores que toma esta variable, de nombre "GM_modulos_q_atiende", a lo largo de la simulación de una terminal con dos grúas móviles y tres módulos de carga/descarga con grúas pórtico. Las casillas marcadas con "1" indican las zonas de trabajo posibles para cada grúa. De tal forma que, en el ejemplo representado, la grúa móvil 1 puede trabajar como recursos compartido entre los módulos 1 y 2 con grúas pórtico, la grúa móvil 2 puede trabajar sólo en el módulo 2 con grúas pórtico, mientras que el módulo 3 con grúas pórtico no necesita ninguna grúa móvil para funcionar.

	GM_modulos_q_atiende						
Grúa móvil1	1	1	0	0	0	0	0
Grúa móvil2	0	1	0	0	0	0	0
Grúa móvil3	0	0	0	0	0	0	0
Grúa móvil4	0	0	0	0	0	0	0
Grúa móvil5	0	0	0	0	0	0	0
	Módulo1 con GP	Módulo2 con GP	Módulo3 con GP	Módulo1 sin GP	Módulo2 sin GP	Módulo3 sin GP	Módulo4 sin GP

Figura 6.12. Acceso de grúas móviles a módulos de carga/descarga. Fuente: elaboración propia.

Cada módulo de carga/descarga posee diversos elementos "machine" donde trabajan las grúas móviles (representadas por elementos "labor"). Estos elementos "machine" evaluarán, según el módulo donde estén situados, una columna u otra

de la variable "GM_modulos_q_atiende", con el objetivo de identificar qué grúas móviles pueden atenderlos.

Lógica para gestionar las zonas de trabajo de los tractores de maniobra

En este caso, también se ha creado una variable que recoge información, previamente almacenada en la interfaz de usuario, para gestionar las zonas de trabajo de los tractores de maniobra. Según lo indicado en la Figura 6.13, esta variable posee tres filas (una por cada uno de los tractores de maniobra que puede tener como máximo la terminal a simular) y dos columnas (una por cada una de las zonas donde puede trabajar un tractor: zona de carga/descarga y/o zona de clasificación). Las casillas marcadas con "1" indican las zonas donde puede trabajar cada tractor. De tal forma que, en el ejemplo representado, el tractor de maniobras 1 puede trabajar en la zona de carga/descarga y en la zona de clasificación; mientras que los tractores 2 y 3 sólo pueden trabajar en la zona de clasificación.

El diagrama muestra una variable llamada **TM_zona_q_atiende** representada como una tabla de 3 filas y 2 columnas. Las filas corresponden a los tractores de maniobra 1, 2 y 3. Las columnas corresponden a la 'Zona carga/descarga' y la 'Zona clasificación'. Los valores en las celdas indican si el tractor puede trabajar en esa zona (1) o no (0).

	Zona carga/descarga	Zona clasificación
Tractor maniobras1	1	1
Tractor maniobras2	0	1
Tractor maniobras3	0	1

Figura 6.13. Acceso de tractores de maniobra a zonas de una terminal. Fuente: elaboración propia.

Al igual que en el caso anterior, la zona de carga/descarga y la zona de clasificación poseen diversos elementos "machine" donde trabajan los tractores de maniobras (representados por elementos "labor"). Estos elementos "machine" evaluarán una columna u otra de la variable "TM_zona_q_atiende", según la zona donde estén situados, con el objetivo de identificar qué tractor de maniobra puede prestar servicio en ellas.

Lógica interna de los módulos

Los elementos "machine" que componen cada módulo de carga/descarga evaluarán los atributos de los camiones/tractores con plataforma entrantes, con el objetivo de identificar las operaciones (descarga cerca de las vías, carga cerca de las vías, etc.) que hay que realizar sobre cada uno de ellos. Del mismo modo, se evaluarán los atributos de cada contenedor que haya entrado en tren, para determinar cuál es su próximo destino: salida en camión, salida en tractor con plataforma o salida en otro tren.

Las plataformas utilizadas para transportar contenedores también llevan asociadas una serie de atributos. Estos atributos se utilizan, en los módulos de carga/descarga, para relacionar cada tren saliente con el tren entrante que le cede sus plataformas y, en la zona de clasificación, para determinar dónde deber ser colocado cada lote de plataformas transportado por un tren entrante.

6.6. PROGRAMACIÓN DE LA INTERFAZ DE USUARIO

Según lo indicado en el subapartado 6.3.2, la interfaz de usuario se ha implementado usando un archivo de Microsoft Excel. Este archivo está compuesto por varias de hojas de cálculo, donde un usuario puede configurar las características de diseño (funciones, tipo de recursos y de infraestructuras, otras características de diseño relativas a los recursos y a las infraestructuras disponibles y layout) y las características de operación (reglas de operación, horarios para la prestación de servicios y demanda) de la terminal a simular.

La Figura 6.14 muestra una hoja de la interfaz de usuario, donde se recogen los parámetros necesarios para configurar los tractores de maniobras. En el Anexo B, se presentan todos los aspectos del modelo de simulación que pueden ser configurados a partir de la interfaz de usuario. La definición de estos aspectos está basada en lo conceptualizado en el capítulo 5.

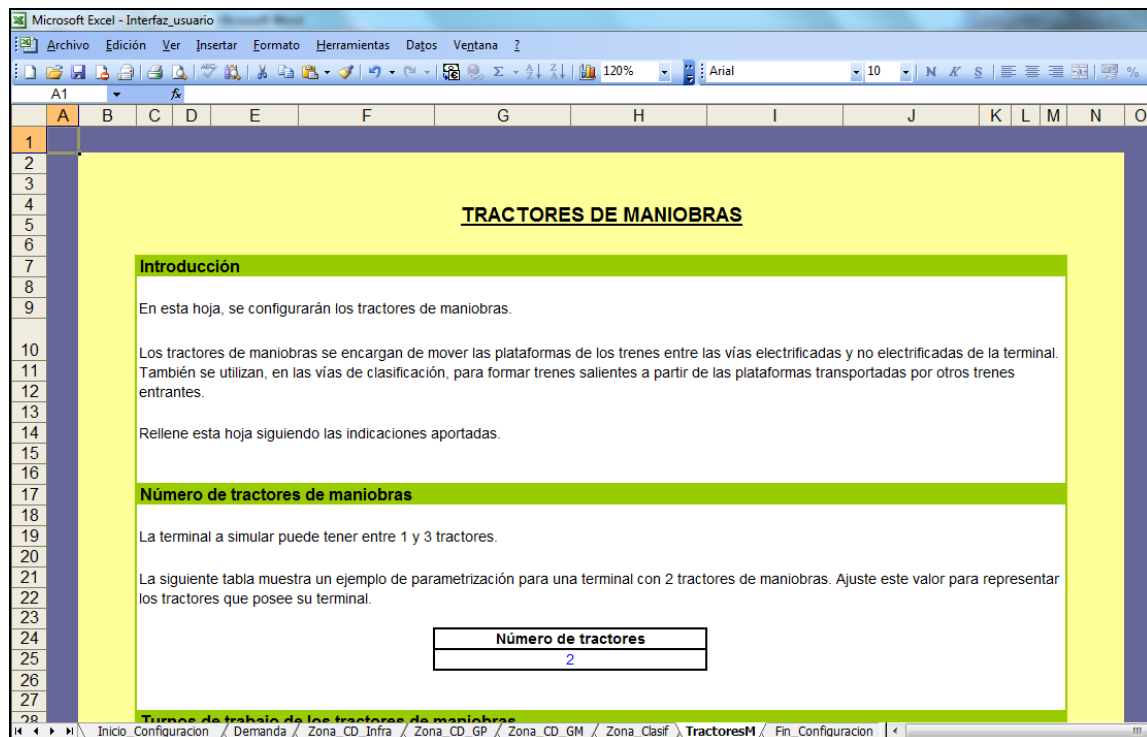


Figura 6.14. Interfaz de usuario. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con lo indicado en el apartado 6.5.3, la interfaz de usuario puede ser utilizada para registrar información que posteriormente será leída, de forma automática, por algún elemento del modelo de simulación (por ejemplo, por un elemento "variable"), además de poder ser empleada para generar los ficheros que requieren ciertos elementos del modelo de simulación para configurar su cuadro de detalle. La Figura 6.15 muestra un ejemplo relativo a la generación de estos ficheros. En la parte izquierda de la Figura 6.15 aparece la tabla utilizada, en la interfaz de usuario, para configurar el turno de trabajo de un tractor de maniobras. Una vez completada esta tabla, el usuario debe ejecutar una macro, implementada en Microsoft Visual Basic y vinculada con el botón "Generar_ficheros *.sft". Esta macro permite convertir los datos introducidos en Excel en ficheros con un formato comprensible por los elementos "shift" definidos en el modelo de simulación para representar el turno de trabajo de un tractor. El formato de estos ficheros aparece representado en el parte izquierda de la Figura 6.15.



Figura 6.15. Generación de ficheros a partir de la interfaz de usuario. Fuente: elaboración propia.

La interfaz de usuario permite configurar escenarios deterministas o estocásticos (donde uno o varios aspectos de la terminal a simular evolucionan de forma aleatoria en el tiempo). En este último caso, un usuario puede configurar los parámetros de las distribuciones teóricas y/o empíricas que se han creado en el modelo de simulación para representar:

- Los tiempos de operación de cada una de las tareas que tienen lugar en la terminal a simular: acceso de vehículos a través de la puerta de entrada, carga de vehículos, etc.

- Las tasas de averías y de reparación de cada uno de los equipos (grúas móviles, grúas pórtico y tractores de maniobra) que posee la terminal.
- Los patrones de llegada de los camiones/tractores con plataforma.
- Los adelantos/retrasos que pueden aparecer sobre la llegada planificada de los trenes.
- Las variaciones que pueden surgir sobre la composición planificada de los trenes entrantes. Según lo expuesto en el apartado 5.5, puede que, en este caso, parte de los contenedores planificados no hayan sido cargados en origen y/o que los trenes transporten más contenedores de lo planificado.
- Los retrasos que pueden aparecer sobre la salida planificada de los trenes por causas ajenas a la terminal a simular.
- Las variaciones que pueden existir sobre la composición planificada de los trenes salientes. Según lo indicado en el apartado 5.5, puede que, en este caso, parte de los contenedores que deberían salir en tren no lleguen a la terminal para ser cargados a pesar de tener un servicio de transporte contratado y/o que ciertos contenedores lleguen después de que se haya cerrado la carga del tren con el que están relacionados.

Además, la interfaz de usuario ha sido provista de múltiples utilidades que permiten evitar errores durante el proceso de entrada de datos. Estas utilidades hacen referencia a:

- Las explicaciones y los ejemplos que se dan sobre los datos a configurar (véase el caso 1 de la Figura 6.16).
- Los mensajes de error que aparecen cuando una celda a configurar se deja en blanco (véase el caso 2 de la Figura 6.16).
- Los mensajes de error que aparecen cuando un dato introducido es incorrecto (véase el caso 3 de la Figura 6.16).
- Los mensajes de error que aparecen cuando se quiere cambiar la estructura o el formato de una hoja de cálculo (véase el caso 4 de la Figura 6.16).
- Los vínculos que existen entre hojas de cálculo para garantizar que el usuario sigue el orden correcto a la hora de completar la interfaz de usuario (véase el caso 5 de la Figura 6.16).

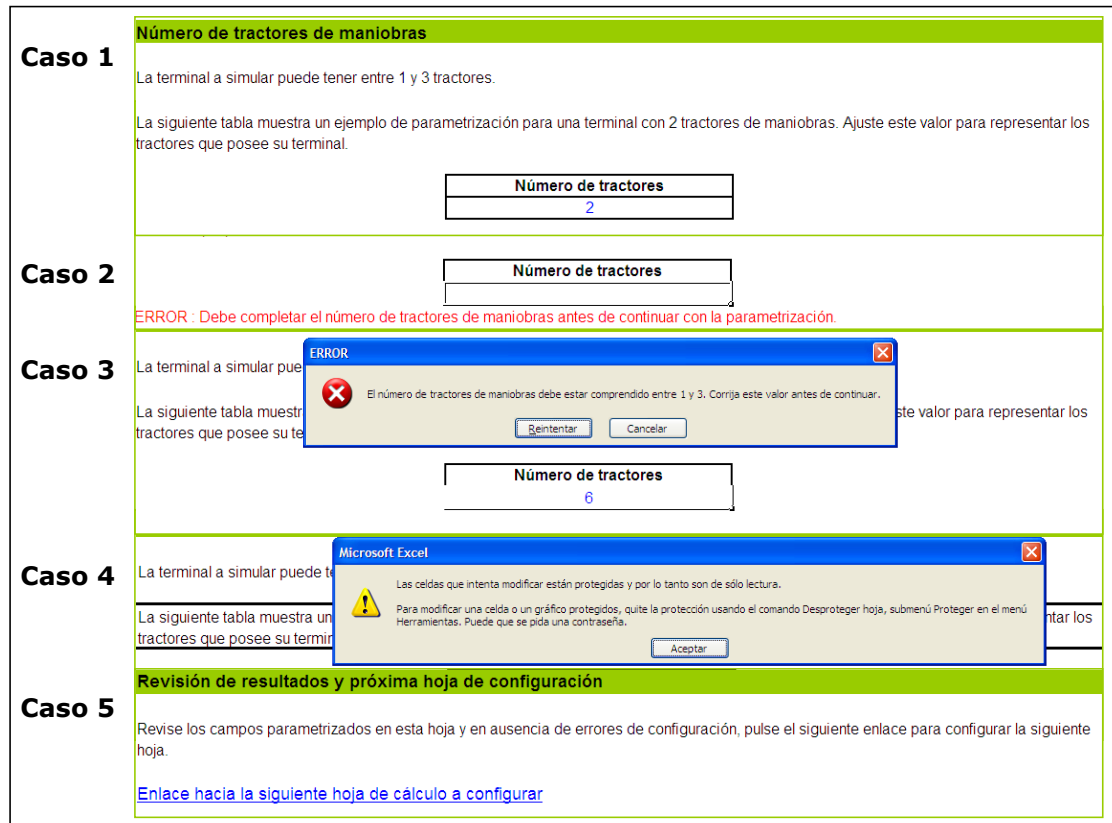


Figura 6.16. Utilidades implementadas para evitar errores en la entrada de datos. Fuente: elaboración propia.

6.7. SIMULACIÓN DE ESCENARIOS CON LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN

Para simular un escenario con la plataforma flexible desarrollada en esta tesis, es necesario aplicar cinco pasos. En primer lugar, el usuario debe completar la interfaz de usuario con las características de la terminal a simular. En segundo lugar, debe abrir el modelo de simulación y activar los módulos necesarios para representar la terminal a simular (véase el subapartado 6.5.2). En tercer lugar y sólo si es preciso, puede reordenar el “display” del modelo para asignar una nueva ubicación, similar a la del sistema a representar, a los módulos/elementos activos. A continuación, debe vincular el modelo de simulación con la interfaz de usuario, asignando el nombre de la interfaz a la variable “Nombre_fichero” (véase el subapartado 6.5.3). Por último, debe ejecutar la simulación y analizar los resultados que de ella se desprenden.

Si todos los datos de entrada son deterministas, bastaría con que el usuario simulara una única repetición del modelo. Sin embargo, si alguno de estos datos es aleatorio, el usuario debería usar los menús de Witness para simular varias repeticiones. Los resultados obtenidos tras simular cada repetición serían utilizados para estimar los valores de las variables de salida proporcionadas por la plataforma

flexible. Éste último procedimiento se tratará con más detalle en el apartado 7.5 (validación de resultados de la plataforma flexible de simulación) y en el capítulo 8 (experimentación con la plataforma flexible de simulación).

Aplicando estos pasos, la plataforma flexible desarrollada en esta tesis podría ser utilizada para estudiar el funcionamiento de una o varias terminales aisladas, así como sus alternativas de mejora. En trabajos futuros, esta plataforma podría ser utilizada también para generar los distintos nodos que componen un modelo de red. En este caso, un enfoque modular, similar al aplicado en el subapartado 6.5.2, podría ser utilizado para encapsular, en un único módulo, lo programado en el modelo de simulación de esta tesis. Este módulo podría ser clonado tantas veces como terminales tuviera la red a simular. La interfaz de usuario de esta tesis también podría ser replicada, de tal forma que la variable "Nombre_fichero" de cada módulo/terminal pudiera ser actualizada, con el objetivo de vincular cada nodo con un fichero Excel diferente.

Capítulo 7

VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DE LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN

7.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo, que se enmarca dentro de la tercera fase de la metodología descrita en el apartado 3.5 (“Diseño, desarrollo y experimentación con la plataforma flexible de simulación”), se estructura en cinco apartados. Tras esta introducción, en el apartado 7.2, se definen los términos “verificación” y “validación” y se posicionan dentro de un estudio de simulación. Los apartados 7.3, 7.4 y 7.5 describen las técnicas empleadas para verificar y validar la plataforma flexible de simulación presentada en esta tesis.

7.2. ETAPAS DE VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN DENTRO DE UN ESTUDIO DE SIMULACIÓN

Los modelos de simulación son frecuentemente utilizados como herramientas de apoyo para la toma de decisiones. Por tanto, las personas encargadas de utilizarlos necesitan saber si el modelo de simulación con el que van a trabajar y los resultados que éste proporciona son adecuados para apoyar las decisiones que tienen que tomar. Esta adecuación del modelo de simulación y de sus resultados al problema de estudio se consigue, entre otros aspectos, a través de su verificación y de su validación.

Banks et al. (2001), Law (2007) y Sargent (2010) proporcionan definiciones similares sobre los términos “verificación” y “validación”. De acuerdo con estos autores, la verificación de un modelo de simulación consiste en determinar si el código programado está lo suficientemente depurado como para realizar lo previsto, mientras que su validación consiste en determinar si el modelo de simulación es una representación adecuada del sistema de estudio para los objetivos planteados.

La Figura 7.1 representa parte de las etapas que componen un estudio de simulación. Las etapas recogidas en los rectángulos hacen referencia a: la recogida de información sobre el sistema de estudio, la construcción del modelo conceptual, la implementación informática del modelo conceptual y la experimentación con el modelo de simulación. En estos rectángulos, también se muestra el resultado que se obtiene tras llevar a cabo cada una de estas etapas: información sobre el sistema de estudio, modelo conceptual, modelo de simulación y resultados de los escenarios analizados. Las flechas coloreadas que aparecen en la Figura 7.1 indican los puntos donde se enmarcan las etapas de verificación y de validación dentro de un estudio de simulación.

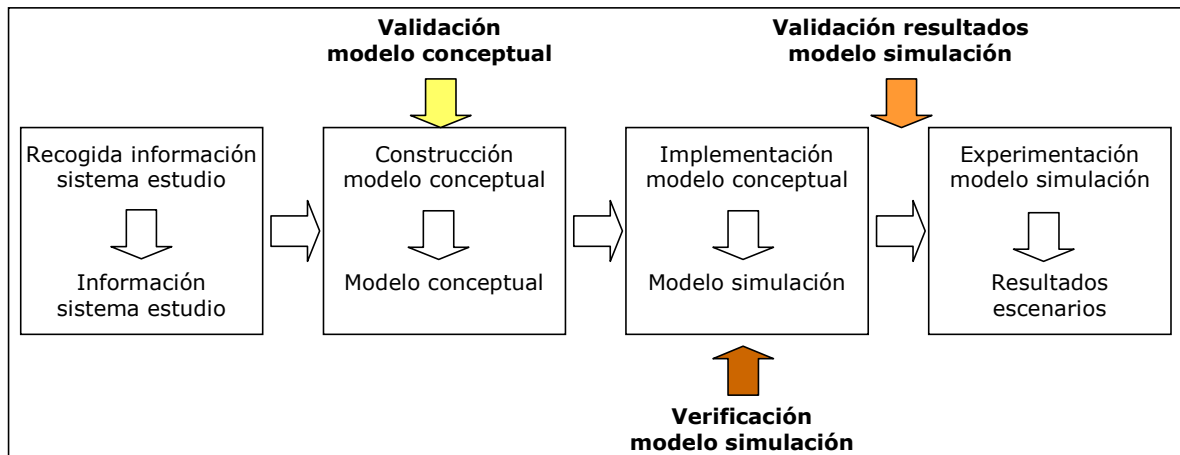


Figura 7.1. Etapas de verificación y de validación dentro de un estudio de simulación.
Fuente: elaboración propia basada en Banks et al. (2001), Law (2007) y Sargent (2010).

Según Banks et al. (2001), Law (2007) y Sargent (2010), una de las tareas más importantes y más complejas dentro de un estudio de simulación es determinar si el modelo de simulación creado es una representación válida del sistema considerado como objeto de estudio.

El proceso de validación de un modelo de simulación suele estar dividido en dos etapas (Banks et al., 2001; Law, 2007 y Sargent, 2010). Por un lado, debe validarse el modelo conceptual del sistema a representar (véase la flecha amarilla en la Figura 7.1), comprobando que las asunciones realizadas al construirlo son adecuadas con los objetivos planteados. Por otro lado, deben validarse los resultados proporcionados por el modelo de simulación (véase la flecha naranja en la Figura 7.1), para determinar si, ante unas mismas entradas, sus salidas son similares a las del sistema real simulado.

La flecha marrón representada en la Figura 7.1 muestra la necesidad de comprobar, durante la etapa de implementación, que el modelo de simulación ha sido programado correctamente.

Estas tres etapas han sido aplicadas para verificar y validar la plataforma flexible de simulación desarrollada en esta tesis. En los siguientes apartados, se recogen las técnicas empleadas para validar el modelo conceptual de la plataforma flexible (véase el apartado 7.3), las técnicas empleadas para verificar esta herramienta (véase el apartado 7.4) y las técnicas empleadas para validar sus resultados (véase el apartado 7.5).

El trabajo realizado a lo largo de estos tres apartados ha permitido identificar que la validación y la verificación de la plataforma flexible de esta tesis es más compleja que la de un modelo de simulación no flexible encargado de representar una terminal real concreta.

La validación de la plataforma flexible presentada en esta tesis ha sido compleja debido a que el sistema real de referencia con el que debería compararse su modelo conceptual y sus resultados no es único y a que la plataforma flexible puede representar y estudiar escenarios que no existen en la realidad y que, por tanto, no pueden ser comparados con un sistema real de referencia. Del mismo modo, existen dos aspectos que han hecho que la verificación de la plataforma flexible de esta tesis sea más compleja que la de un modelo de simulación no flexible. En primer lugar, cada alternativa de diseño y de operación implementada en la plataforma flexible incrementa el número de líneas de código a depurar. En segundo lugar, en una plataforma flexible como la presentada en esta tesis, no sólo debe verificarse el código relativo al modelo de simulación, sino que también deben depurarse las líneas de código implementadas en la interfaz de usuario y las líneas de código que permiten relacionar la interfaz de usuario con el modelo de simulación.

7.3. VALIDACIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DE LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN

Según lo expuesto en el capítulo 5, el modelo conceptual desarrollado en esta tesis captura aquellos aspectos de la realidad que son relevantes para abordar el problema de estudio planteado y sirve como paso previo a la implementación informática de la plataforma flexible.

Dado que este modelo conceptual es una abstracción de un sistema real, debe garantizarse, a lo largo de su desarrollo, que sus asunciones sean correctas y que hagan referencia a aspectos relevantes para atender los objetivos marcados al inicio del estudio de simulación (Banks et al., 2001 y Pidd, 2004).

Siguiendo las indicaciones propuestas por Kleijnen (1995), Banks et al. (2001), Pidd (2004), Law (2007) y Sargent (2010), se han empleado las siguientes técnicas para asegurar que el modelo conceptual presentado en el capítulo 5 es una representación válida de la realidad para el problema de estudio planteado en esta tesis:

- Los objetivos, el alcance, la caracterización y el nivel de decisión del problema de estudio, definidos en los apartados 1.2 y 3.3, han sido tomados como punto de partida para desarrollar el modelo conceptual de las terminales a representar con la plataforma flexible de esta tesis.

- El modelo conceptual ha sido creado de forma gradual, comenzando con la identificación general de las terminales a representar (véase el apartado 5.2) y continuando con una definición más detallada de cada una de ellas en términos de diseño y de operación (véase los apartados 5.3 y 5.4).
- Al comienzo de esta tesis, se estableció contacto con expertos en transporte ferroviario de contenedores y se visitaron varias terminales españolas para recabar información sobre el sistema considerado como objeto de estudio. Adicionalmente, gran parte de las conclusiones que se derivaron de esta fuente de información fueron confirmadas y completadas con los resultados obtenidos tras realizar una primera revisión bibliográfica y un primer estudio de distintas fuentes "on-line".
- El contacto con expertos, no sólo al comienzo de esta tesis, sino a lo largo del diseño y del desarrollo de la plataforma flexible finalmente presentada, así como la consulta periódica de nuevas publicaciones y fuentes "on-line", ha permitido corregir, precisar y ampliar ciertas asunciones realizadas inicialmente sobre el funcionamiento de las terminales consideradas como objeto de estudio y sobre los datos que éstas necesitan para operar. Por ejemplo, una de las asunciones iniciales corregidas sobre el funcionamiento del sistema de estudio hace referencia al criterio que define el cierre del proceso de carga de un tren. En García y García (2009), primer prototipo de la plataforma flexible de esta tesis, se fijó, al no disponer de otra información al respecto, que la carga de los trenes se cerrara cuando todos sus contenedores hubieran sido cargados. De esta forma, un tren podía llegar a salir con retraso si sus contenedores entraban en la terminal con poca antelación respecto a su instante de salida en tren. Las entrevistas con expertos realizadas después de esta primera publicación permitieron identificar que la carga de los trenes españoles se cierra cierto tiempo antes de su salida, dejando sin cargar los contenedores que llegan a la terminal después de este cierre. Este criterio de operación, aplicado para evitar posibles retrasos en la salida de los trenes, ha sido recogido en posteriores prototipos (véase García y García, 2012 y García-Hernández y García-Gutiérrez, 2012) y en la propia plataforma flexible de simulación presentada finalmente en esta tesis, al parecer más coherente que el indicado en García y García (2009).

La aplicación de estas técnicas ha permitido considerar que el modelo conceptual presentado a lo largo del capítulo 5 es suficientemente válido como para representar las terminales elegidas como objeto de estudio en esta tesis,

permitiendo pasar a su implementación informática, que ha sido recogida en el capítulo 6.

7.4. VERIFICACIÓN DE LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN

Durante la implementación de una herramienta de simulación, debe verificarse que las asunciones del modelo conceptual estén siendo programadas correctamente.

La identificación y corrección de errores sobre el código programado a lo largo del desarrollo de la plataforma flexible se ha simplificado gracias a (Banks et al., 2001; Chung, 2003; Pidd, 2003; Law, 2007; Sargent, 2010):

- La elección de un entorno de simulación como Witness para programar el modelo de simulación. Las utilidades que presenta Witness (elementos predefinidos, cuadros de diálogo que pueden ser utilizados para configurar ciertas características de estos elementos, etc.) frente a otros softwares de simulación (como las hojas de cálculos, los lenguajes de propósito general o los lenguajes de simulación) han permitido reducir el número líneas de código necesarias para programar el modelo de simulación y por tanto, el número de líneas de código a depurar. Del mismo modo, la utilización de hojas de cálculo frente a otras aplicaciones (como las bases de datos o los cuadros de diálogo) ha permitido reducir el código necesario para construir la interfaz de usuario y con ello, el número de líneas de código a verificar.
- El desarrollo de prototipos antes de implementar la plataforma flexible finalmente presentada en esta tesis. Entre otros aspectos, el desarrollo de prototipos ha permitido alcanzar un mayor aprendizaje sobre Witness y Excel, lo que, a su vez, ha permitido reducir el número de errores de programación que hubieran podido aparecer, durante el desarrollo de la plataforma flexible, si no se hubieran realizado.
- La división del modelo de simulación en módulos. La creación de módulos ha facilitado la verificación gradual de la plataforma flexible de simulación, ya que, en esta tesis, cada módulo ha sido sometido a diversas pruebas para dejarlo libre de errores antes de abordar el desarrollo del siguiente.
- El incremento paulatino de la complejidad del modelo de simulación. El enfoque de programación adoptado en esta tesis, donde cada módulo se ha

programado tomando como punto de partida situaciones sencillas que, según se han ido verificando, han dado paso a situaciones más complejas hasta alcanzar gradualmente lo que se quería simular, ha sido de gran ayuda para verificar la plataforma flexible. Este enfoque incremental de programación también ha sido de gran utilidad para verificar el funcionamiento global del modelo de simulación según se iban uniendo sus distintos módulos.

- La simulación paso a paso de distintos escenarios. La lista de eventos que muestra Witness al ejecutar paso a paso un modelo de simulación ha sido imprescindible para identificar errores de programación en el modelo y en las líneas de código que permiten conectar sus elementos con la interfaz de usuario. Del mismo modo, la simulación de estos escenarios ha sido de gran utilidad para identificar y corregir fallos relativos a las utilidades implementadas en la interfaz de usuario para evitar errores durante el proceso de entrada de datos y para convertir parte de estos datos de entrada en ficheros con un formato comprensible por ciertos elementos del modelo de simulación.
- La representación gráfica y la animación del modelo de simulación. Ambas utilidades del modelo de simulación han sido empleadas de forma combinada con la simulación paso a paso para identificar errores en la programación del modelo y en las líneas de código que conectan sus elementos con la interfaz de usuario.
- El análisis crítico de los resultados generados por el modelo de simulación. Para depurar la lógica programada, ha sido de gran utilidad la simulación de distintos escenarios y la comparación de sus resultados con aquellos que pueden ser calculados a mano o con aquellos cuyo valor puede ser conocido, en orden de magnitud. Del mismo modo, los resultados proporcionados por el modelo de simulación han sido de gran ayuda para verificar que la media simulada de las distribuciones de probabilidad que forman parte del modelo de simulación es coherente con la media teórica configurada en la interfaz de usuario.

Tras aplicar estas técnicas y corregir los errores de programación encontrados, se puede considerar que la plataforma flexible de esta tesis está lo suficientemente depurada como para comenzar a validar sus resultados. Esta etapa aparece recogida en el apartado siguiente.

7.5. VALIDACIÓN DE RESULTADOS DE LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN

Después de haber implementado y verificado la plataforma flexible de simulación, ésta ha sido utilizada para simular diversos escenarios. Los escenarios simulados se han basado en la información recabada a partir de las entrevistas con expertos españoles en transporte ferroviario de contenedores y en las visitas a terminales reales, ya que otras fuentes de información consultadas a lo largo del desarrollo de esta tesis (como, por ejemplo, la revisión bibliográfica o las fuentes “on-line”) no proporcionan todos los datos de entrada necesarios para implementar un caso de estudio. Por ejemplo, ninguno de los artículos ni ninguna de las fuentes “on-line” consultadas muestra un plan de trenes donde se detalle el día y la hora de entrada/salida de los trenes a/de una terminal, “input” esencial para la plataforma flexible de simulación presentada en esta tesis.

Los resultados obtenidos tras realizar estas simulaciones han sido contrastados con expertos, con el objetivo de conocer si la plataforma flexible proporciona resultados coherentes. En la literatura, esta técnica de validación recibe el nombre de “face validity” (véase Kleijnen, 1995; Banks et al., 2001; Law, 2007 y Sargent, 2010).

Entre los resultados contrastados con expertos a lo largo del proceso de desarrollo de la plataforma flexible, se encuentran, por ejemplo, los recogidos en los casos de estudio de García y García (2012). En esta publicación, se utiliza un prototipo de la plataforma flexible para comparar dos configuraciones alternativas para la zona de carga/descarga de una terminal, donde además de existir una playa de almacenamiento, grúas móviles y grúas pórtico, existen las siguientes infraestructuras bajo pórtico:

- Configuración 1: cinco vías de carga/descarga y dos líneas de almacenamiento (una dedicada al almacenamiento de contenedores que han sido descargados de trenes y otra encargada de almacenar contenedores que serán cargados sobre trenes).
- Configuración 2: cuatro vías de carga/descarga y tres líneas de almacenamiento (una dedicada al almacenamiento de contenedores que han sido descargados de trenes y dos encargadas de almacenar contenedores que serán cargados sobre trenes).

Ante una misma demanda, los resultados proporcionados por el prototipo indican que el uso de la playa de almacenamiento y de las grúas móviles es menor

en la configuración 2 que en la configuración 1, al haber aumentado el número de contenedores entrantes en la red ferroviaria que pueden ser colocados cerca de las vías por las grúas pórtico. En ambas configuraciones, la terminal proporcionan buenos niveles de servicio, sin embargo, no es posible determinar cuál de ellas proporciona menores tiempos medios de estancia para los camiones, ya que el valor de este indicador no sólo depende de la disponibilidad de una zona de almacenamiento u otra ni de la disponibilidad de un tipo de grúa u otro, sino también de la disponibilidad de otros elementos de la terminal (como, por ejemplo, de la puerta de entrada/salida de camiones).

En vista de estos resultados, los expertos consultados identificaron un comportamiento coherente del prototipo para las configuraciones simuladas.

Cuando la plataforma flexible de simulación finalmente presentada en esta tesis estuvo implementada y validada, ésta fue utilizada para estudiar las dos configuraciones presentadas anteriormente. Las conclusiones de este estudio desvelaron un comportamiento de los resultados de la plataforma flexible similar al contrastado con los expertos españoles.

De forma complementaria a esta validación cualitativa de resultados, se ha realizado una validación cuantitativa de los mismos usando un caso de estudio. A lo largo de los tres subapartados siguientes, se describe el sistema real a simular, los resultados recabados sobre su funcionamiento, los ajustes que se han tenido que realizar sobre la plataforma flexible para simular este escenario, las condiciones bajo las que se ha ejecutado la simulación, los resultados obtenidos por la plataforma flexible y la comparación de estos últimos resultados con los resultados presentes en el sistema real.

7.5.1. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA A SIMULAR Y DE LOS RESULTADOS A COMPARAR

El contacto con expertos españoles en transporte ferroviario de contenedores permitió recabar información sobre un sistema real no analizado en el estudio específico de terminales para validar cuantitativamente parte de los resultados proporcionados por la plataforma flexible de simulación. Usando un cuestionario con más de 30 preguntas, se consiguió información sobre:

- Las funciones de la terminal considerada como objeto de estudio, las características de diseño relativas a sus infraestructuras (tipo, número y capacidad de las zonas de almacenamiento de contenedores, número y longitud de las vías de carga/descarga, etc.), las características de diseño

relativas a sus recursos (tipo de grúas empleadas, número de grúas de cada tipo, etc.) y su layout (distancias entre la puerta de entrada/salida de camiones y las vías de carga/descarga, entre las vías de carga/descarga y la playa de almacenamiento, etc.).

- El plan de trenes satisfecho durante uno de los meses de trabajo de esta terminal (número de trenes cargados/descargados por semana, número de contenedores por tren, etc.) y el patrón de llegadas para los camiones durante este período (número de camiones cargados/descargados por semana, franjas horarias con mayor afluencia de camiones, etc.).
- Las reglas de operación (reglas para operar la playa de almacenamiento, para cargar trenes, etc.) y los horarios de trabajo (horarios de entrada/salida de camiones, de trabajo de las grúas, etc.) aplicados por la terminal para satisfacer la demanda.

Parte de la información recabada a partir de este cuestionario (por ejemplo, el tipo de grúas o el número de grúas disponibles) es pública y por tanto, ha sido citada sin distorsión alguna a lo largo de este subapartado. Otros datos (por ejemplo, relativos al plan de trenes o al número medio de plataformas y de contenedores transportados por tren) han sido distorsionados para ilustrar, sin comprometer la confidencialidad de la información proporcionada por los expertos, los datos de entrada que necesita la plataforma flexible para simular una terminal, así como el proceso aplicado para validar cuantitativamente sus resultados.

De esta forma, se ha establecido que la terminal ferroviaria de contenedores a simular se encarga de intercambiar contenedores entre trenes y camiones y que para realizar esta tarea, dispone de las siguientes infraestructuras y recursos:

- Una puerta de entrada/salida de camiones, que está operativa de lunes a viernes de 7:30 a 19:30 y que es atendida por un único trabajador por turno.
- Una vía de entrada/salida que conecta la terminal con la red ferroviaria las 24 horas del día, los 7 días de la semana.
- Tres vías empleadas para: retirar la locomotora transportada por los trenes entrantes, colocar la locomotora a los trenes salientes y aparcar los trenes entrantes/salientes hasta que exista una vía de carga/descarga libre donde atenderlos o hasta que llegue su hora de salida de la terminal.

- Una playa de carga/descarga de trenes y camiones atendida por grúas móviles y pórtico, donde existe:
 - Una playa de almacenamiento de 20 metros de ancho y 200 metros de largo, donde los contenedores se colocan preferentemente en superficie. Cuando no quede espacio libre en superficie, los contenedores podrán ser apilados hasta tres alturas.
 - Seis vías de carga/descarga, bajo pórtico, de longitud 450m.
 - Dos líneas de almacenamiento de longitud similar a las vías de carga/descarga y con capacidad para apilar contenedores hasta dos alturas. Ambas líneas están situadas bajo pórtico, una a cada lado de las vías. Una de ellas está dedicada al almacenamiento de contenedores que van a salir en tren y la otra al almacenamiento de contenedores que van a salir en camión. Las grúas móviles tienen acceso a ellas para atender la carga/descarga de camiones y para gestionar el movimiento de contenedores entre la playa y las líneas de almacenamiento. En esta terminal, se mueven contenedores que van a salir en camión desde la zona de las vías a la playa de almacenamiento cuando la ocupación de la línea que los contiene supera el 50% de su capacidad máxima.
 - Dos áreas de carga/descarga de camiones. Una situada en las proximidades de la playa de almacenamiento y otra bajo pórtico. El número máximo de camiones que pueden estar aparcados, de forma simultánea, en estas áreas no debe ser superior a 10.
- Dos grúas móviles y dos grúas pórtico, de las cuales sólo trabaja una de cada tipo. La terminal posee dos operarios de grúa de lunes a viernes de 9:00 a 17:00 (uno encargado de manipular la grúa móvil y otro encargado de manipular la grúa pórtico) y un único operario de grúa de lunes a viernes de 7:30 a 9:00 y de 17:00 a 19:30 para manejar ambas grúas.
- Dos tractores de maniobra, de los cuales sólo está operativo uno las 24 horas del día, los 7 días de la semana.

Estas infraestructuras y recursos son capaces de satisfacer una demanda semanal de: cinco trenes entrantes, cinco trenes salientes y 300 camiones.

Los trenes entrantes llegan a las 10:28 de martes a sábado, volviendo a salir cargados a las 15:40 en días posteriores.

Los trenes no suelen salir con retraso por causas ajenas a la terminal (por ejemplo, por interferencias con otros trenes que circulan por la red). Sin embargo, suele ser frecuente encontrar retrasos en la llegada de los trenes entrantes. En ciertos casos, estos retrasos pueden llegar a ser de hasta 30 minutos.

El proceso de descarga de un tren comienza tan pronto como éste llega a la terminal. Una vez finalizada esta tarea, el tren vuelve a ser cargado. La carga de los trenes se cierra dos horas antes de su salida de la terminal. La Tabla 7.1 muestra, para cada tren entrante (véase las letras en verde), el día en el que comienza su descarga (véase las letras en azul), los días durante los que se vuelve a cargar (véase las letras en naranja) y el día en el que se cierra su proceso de cargar y en el que tiene lugar su salida de la terminal (véase las letras en rojo). De tal forma que, en el escenario a simular, los trenes que entran el martes, el miércoles y el jueves pueden comenzar a ser descargados/cargados durante el día de su llegada, pero deben esperar hasta el día siguiente para salir de la terminal; los trenes que llegan el viernes también pueden comenzar a ser descargados/cargados durante el día de su llegada, aunque deben esperar hasta el lunes de la semana siguiente para salir de la terminal; mientras que los trenes que llegan el sábado deben esperar hasta el lunes de la semana siguiente para comenzar a ser descargados/cargados y hasta el martes de la semana siguiente para salir de la terminal. Este calendario se repite cíclicamente semana tras semana.

Semana 1							Semana 2	
M	X	J	V	S	D		L	M
E ↓ D ↓ C	C ↓ S	E ↓ D ↓ C	C ↓ S	E ↓ D ↓ C	E		C ↓ S	D ↓ C

Tabla 7.1. Calendario de entrada, descarga, carga y salida de trenes. Fuente: elaboración propia.

Los trenes entrantes suelen transportar 23 plataformas, cargadas con una media de 34 contenedores, de los cuales el 29% están vacíos. La composición de los trenes salientes es similar a la de los trenes entrantes en número de plataformas, pero ligeramente inferior en número de contenedores. El número medio de contenedores transportado por un tren saliente está en torno a 24, de los cuales el 40% están vacíos. El tamaño de los contenedores transportados por los trenes entrantes/salientes no es homogéneo. Del total de contenedores recibidos/expedidos por la terminal durante el mes considerado como objeto de estudio, el 34% son de 20 pies, el 26% son de 30 pies y el 40% son de 40 pies.

La mayor parte de los contenedores que llegan en tren suelen abandonar la terminal en camión a lo largo del mismo día de su llegada o un día después, mientras que la mayor parte de los contenedores que salen en tren suelen llegar con menos de tres días de antelación respecto a su salida de la terminal. Las horas con mayor afluencia de llegadas de camiones están comprendidas entre las 11:00 y las 13:00. Durante esta franja horaria también comienzan a descargarse los trenes entrantes, además de ultimarse la carga de los trenes salientes.

En el escenario a simular, no es frecuente que los contenedores que han contratado un servicio de transporte en tren no lleguen a la terminal. Tampoco es frecuente que los camiones a descargar lleguen después de que se haya cerrado el proceso de carga del tren con el que están relacionados.

El cuestionario mencionado al comienzo de este subapartado también permitió obtener información sobre los tiempos empleados para ejecutar las distintas tareas que tienen lugar en el sistema real a simular (entrada/salida de camiones, carga/descarga de camiones, etc.) y sobre el valor numérico de dos indicadores relativos a su nivel de servicio. Estos indicadores, que hacen referencia al número de trenes que salen con retraso por falta de capacidad de la terminal y al número máximo de camiones que esperan simultáneamente fuera de la terminal antes de entrar, serán utilizados para comparar los resultados de la plataforma flexible con la información recabada sobre el sistema real.

En el sistema real, todos los trenes salían según el horario establecido, gracias a la disponibilidad de las infraestructuras y de los recursos existentes en la playa de carga/descarga de trenes y camiones. Por el contrario, la puerta de entrada/salida sufría picos de trabajo puntuales que hacían que ciertos camiones tuvieran que esperar fuera de la terminal antes de entrar.

Los resultados numéricos relativos a estos picos de trabajo han sido distorsionados en la misma línea que los datos de entrada presentados anteriormente, con el objetivo de ilustrar el proceso empleado para validar cuantitativamente los resultados de la plataforma flexible, sin comprometer la confidencialidad de la información proporcionada por los expertos. De esta forma, se ha considerado que los picos de trabajo se producen con mayor frecuencia entre las 11:00 y las 13:00 (franja horaria con mayor afluencia de camiones entrantes a la terminal) y que las colas de espera durante este período pueden llegar a ser de hasta cinco camiones.

7.5.2. AJUSTE DE LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN

Tras caracterizar el sistema real a simular, se estudió si podía ser representado usando la plataforma flexible desarrollada en esta tesis. Este estudio identificó la necesidad de ajustar mínimamente el código de la plataforma flexible para contemplar que un mismo recurso humano pudiera atender a varias grúas de forma simultánea durante un determinado período de tiempo. Este cambio se implementó de forma puntual para el escenario a simular, sin llegar a ser implementado como una característica de diseño de la plataforma flexible, al considerar que un escenario de este tipo, donde se asume que un mismo recurso humano puede manejar dos grúas perdiendo tiempo para moverse de un equipo a otro, sólo está justificado en momentos puntuales donde el volumen de trabajo real de la terminal a simular se encuentra muy por debajo de su volumen de trabajo de diseño. En condiciones normales, esta terminal atendería un número semanal de trenes y de camiones superior, lo que justificaría el uso de recursos humanos dedicados para cada tipo de grúa e incluso, la utilización de un mayor número de grúas.

El resto de aspectos relativos a los elementos y al funcionamiento del sistema real pudieron ser representados por la plataforma flexible sin necesidad de realizar ningún ajuste adicional sobre su diseño ni sobre su programación.

7.5.3. SIMULACIÓN DEL SISTEMA Y COMPARACIÓN DE SUS RESULTADOS CON LOS DEL SISTEMA REAL

Después de implementar y de verificar el ajuste indicado en el subapartado anterior, la plataforma flexible fue utilizada para estudiar el funcionamiento del sistema a simular durante un período de siete días, que comenzaba un jueves y finalizaba el miércoles de la semana siguiente.

Previo a este período de estudio, se consideró un tiempo de calentamiento de tres días. Este tiempo de calentamiento permitió, por un lado, alcanzar las condiciones iniciales existentes en el sistema real al comienzo del período de estudio (mix de plataformas esperado en las vías de carga/descarga, mix de contenedores esperado en las zonas de almacenamiento, etc.) y, por otro lado, eliminar el régimen transitorio inicial al que estaban sometidas las variables de salida a comparar con los resultados recabados sobre el sistema real.

La Figura 7.2 muestra la llegada de los trenes entrantes (véanse las letras marcadas en verde) y la salida de los trenes salientes (véanse las letras en rojo) programados durante el tiempo de calentamiento y durante el período de

simulación, junto a los días en los que salen los contenedores relacionados con cada tren entrante (véanse las flechas y las letras en azul) y los días en los que llegan los contenedores relacionados con cada tren saliente (véanse las flechas y las letras en naranja).

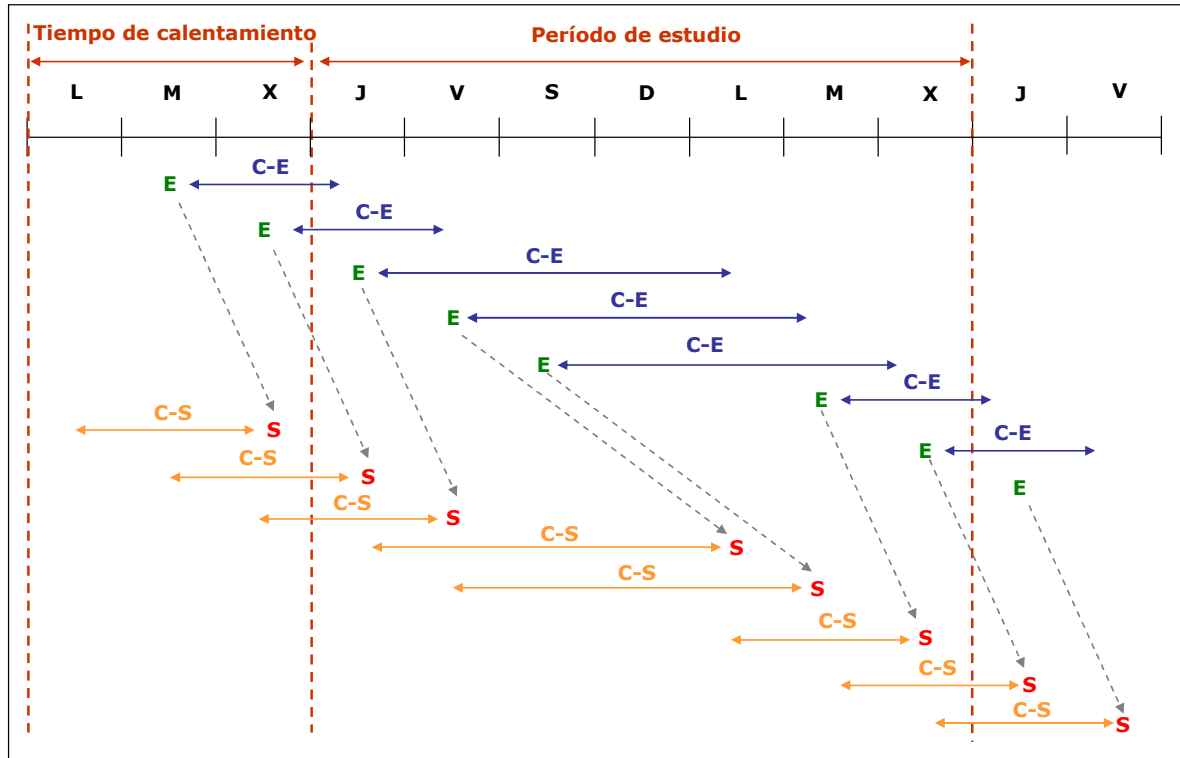


Figura 7.2. Llegada/salida de trenes y de camiones durante el tiempo de calentamiento y durante el período de estudio. Fuente: elaboración propia.

A partir de la Figura 7.2 y de los resultados proporcionados por la plataforma flexible, se ha determinado que:

- Los resultados obtenidos tras simular el primer lunes no son representativos del funcionamiento del sistema real, al considerar sólo la llegada de parte de los contenedores que saldrán el miércoles en tren.
- Los resultados obtenidos tras simular el primer martes tampoco son representativos, al no considerar la salida del tren que debería haber entrado el sábado de la semana anterior.
- Los resultados obtenidos tras simular el primer miércoles tampoco son representativos, ya que, al comienzo de este día, las zonas de almacenamiento sólo albergan contenedores que van a salir en camión procedentes del tren que entró el martes, mientras que, en días posteriores, estas zonas de almacenamiento contienen, como mínimo, contenedores que van a salir en camión relativos a dos trenes entrantes.

- Trascurridos los tres días de calentamiento, puede considerarse que se han alcanzado las condiciones iniciales necesarias para simular el sistema real y que ha quedado eliminado el régimen transitorio al que estaban sometidas las variables de salida de la plataforma flexible.
- El martes y el miércoles de la segunda semana deben contemplar la llegada de contenedores que saldrán en tren el jueves y el viernes de la segunda semana, con el objetivo de que la carga de trabajo existente durante los últimos días del período de estudio sea coherente con la que posee el sistema real.
- La simulación no terminará en vacío, sino que, como en el sistema real, al terminar el miércoles de la segunda semana, deben existir plataformas en las vías de carga/descarga esperando a ser cargadas y contenedores en las zonas de almacenamiento esperando a salir en camión o en tren en días posteriores.

Siguiendo las indicaciones proporcionadas por Banks (1998) y Law (2007) para el estudio de los resultados que se desprenden de una herramienta de simulación, los resultados obtenidos tras ejecutar una única repetición de este escenario de estudio no deben ser comparados por si solos con los resultados recabados sobre el sistema real, dado que la plataforma flexible puede proporcionar resultados diferentes si se varían los números aleatorios empleados para generar valores a partir de las distribuciones de probabilidad utilizadas en el modelo de simulación. En este caso de estudio, se han utilizado distribuciones de probabilidad para representar los retrasos en las llegadas de los trenes, el patrón de llegadas de los camiones y las duraciones de las distintas tareas que tienen lugar en el sistema real a estudiar.

En efecto, al trabajar con datos de entrada aleatorios, los resultados de la plataforma flexible son aleatorios también. Esto hace que los resultados de una única repetición puedan diferir en gran medida de los resultados que la plataforma flexible es capaz de generar con mayor frecuencia, llevando a establecer afirmaciones erróneas sobre el grado de similitud o de diferencia que existe entre los resultados proporcionados por la herramienta de simulación creada y los resultados del sistema real.

Para mitigar este problema, se han ejecutado diez repeticiones del escenario de estudio, usando números aleatorios diferentes para cada una de ellas. A continuación, se han comparado los valores observados, en cada repetición, para el

número de trenes que salen con retraso por falta de capacidad de la terminal (Var.1) y para el número máximo de camiones que esperan simultáneamente fuera de la terminal (Var.2) con la información recabada sobre el sistema real.

La Tabla 7.2 recoge los valores observados para Var.1 y Var.2 en cada repetición, junto a su media, desviación típica y coeficiente de variación.

	Repeticiones										Media	Desv. típica	Coef. variación
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
Var.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Var.2	4	5	4	4	4	4	5	4	4	4	4,2	0,42	10%

Tabla 7.2. Resultados para cada variable de salida tras simular diez repeticiones. Fuente: elaboración propia.

Según muestran las dos últimas columnas de la Tabla 7.2 para Var.1 y Var.2, la desviación típica (que representa la dispersión de un conjunto de datos respecto a su media y que se calcula según la fórmula recogida en la Tabla 7.3) y el coeficiente de variación (que relaciona la dispersión de un conjunto de datos con el valor de su media y que se calcula también según la fórmula recogida en la Tabla 7.3) son pequeños, de tal forma que se puede suponer que los valores observados para cada variable de salida son suficientemente representativos como para compararlos con los obtenidos a partir del sistema real.

Desviación típica	Coeficiente de variación
$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$	$CV_x = \frac{\sigma_x}{\bar{x}} \cdot 100$

Siendo:

σ_x : la estimación de la desviación típica de la población a partir de los valores observados de x en las n repeticiones.

n: el número de repeticiones simuladas (en este caso, n=10).

x_i : el valor observado para la variable de salida x en la repetición i (en este caso, $1 \leq i \leq 10$).

\bar{x} : la media de los valores observados de x en las n repeticiones ($\bar{x} = \sum_{i=1}^n x_i / n$).

CV_x : el coeficiente de variación para los valores observados de x en las n repeticiones.

Tabla 7.3. Fórmulas para calcular la desviación y el coeficiente de variación. Fuente: elaboración propia basada en Banks (1998) y Law (2007).

Comparando los valores obtenidos en cada repetición para cada variable de salida con la información recabada sobre el sistema real, se puede decir que:

- Ni la plataforma flexible (véase la fila Var.1 de la Tabla 7.2) ni el sistema real presentan retrasos en la salida de los trenes por falta de capacidad de la terminal.

- Al igual que en el sistema real, la plataforma flexible muestra momentos en los que la puerta de entrada/salida de camiones sufre picos de trabajo. En este caso, hasta cinco camiones pueden llegar a esperar fuera de la terminal (véase la fila Var.2 de la Tabla 7.2).
- La Figura 7.3 muestra dos gráficos con el número de camiones que esperan antes de entrar en la terminal (a la izquierda) y el número máximo de camiones que esperan de forma simultánea antes de entrar (a la derecha) entre las 7:30-8:30, 8:30-9:30, 9:30-10:30, 10:30-11:30, 11:30-12:30, 12:30-13:30, 13:30-14:30, 14:30-15:30, 15:30-16:30, 16:30-17:30, 17:30-18:30 y 18:30-19:30, lo que cubre el horario de apertura de la puerta de entrada/salida de camiones. Ambos gráficos, se han realizado teniendo en cuenta los valores proporcionados por la plataforma flexible durante el viernes de la repetición 1, primer día en el que se alcanza la cola de espera más larga para esta repetición. Según la Figura 7.3, el mayor número de esperas antes de entrar en la terminal y la cola de espera más larga se encuentra entre las 11:30 y las 12:30. Otros días de esta primera repetición y de otras repeticiones también presentan un gran número de esperas entre las 10:30 y las 13:30, franja horaria donde, al igual que en el sistema real, es frecuente encontrar un gran número de camiones entrantes.

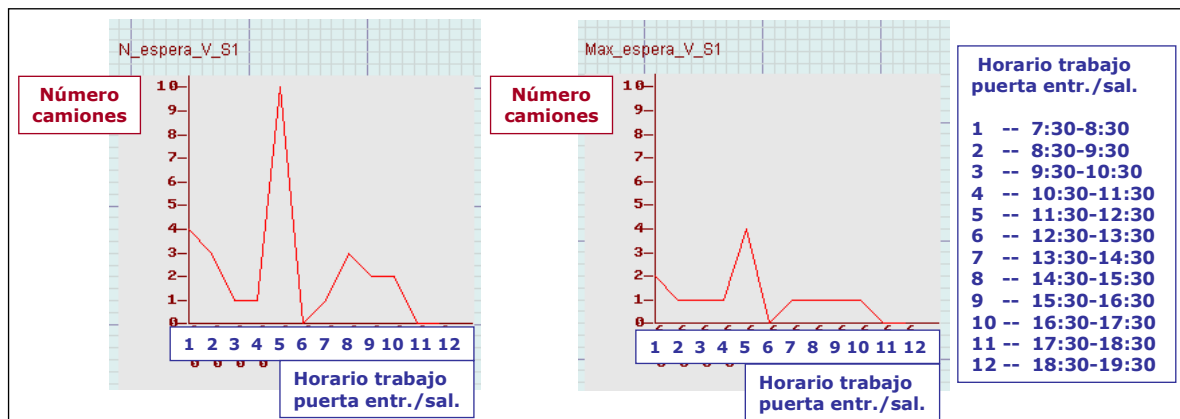


Figura 7.3. Número de camiones que esperan antes de entrar (a la izquierda) y número máximo de camiones que esperan antes de entrar (a la derecha). Fuente: elaboración propia.

Como conclusiones sobre la validación cuantitativa de resultados realizada a lo largo de estos subapartados, se puede señalar que:

- La plataforma flexible no sólo proporciona valores similares a los existentes en el sistema real distorsionado que se ha presentado a lo largo de este apartado para las dos variables de salida estudiadas, sino que también proporciona resultados similares a los existentes en el sistema real sin distorsionar.

- Podría hacerse una validación más completa y precisa de los resultados obtenidos por la plataforma flexible si existiera la posibilidad de visitar el sistema real estudiado, además de otros sistemas adicionales, durante varios días. Estas visitas serían aprovechadas no sólo para recabar información sobre el diseño y la operación de cada terminal, sino también para tomar datos precisos con los que alimentar la plataforma flexible (por ejemplo, llegadas exactas de camiones o de trenes) y resultados con los que comparar nuevas variables de salida de la plataforma flexible (por ejemplo, tiempo medio de estancia para los camiones o porcentaje de utilización de ciertos equipos de la terminal).
- Las etapas de verificación y de validación de una herramienta de simulación no deben ser consideradas como etapas a realizar una única vez en un punto concreto de un estudio de simulación, sino que deben extenderse a lo largo del diseño y del desarrollo de la herramienta de simulación e incluso, a lo largo de sus primeros usos como herramienta de experimentación. En esta línea, por ejemplo, el escenario utilizado para validar cuantitativamente los resultados de la plataforma flexible han sido de gran utilidad para identificar y corregir ciertos errores de programación que habían pasado inadvertidos tras una primera verificación de esta herramienta.

Capítulo 8

EXPERIMENTACIÓN CON LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN

8.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo, que cierra la tercera fase de la metodología descrita en el apartado 3.5 (“Diseño, desarrollo y experimentación con la plataforma flexible de simulación”), se utiliza la herramienta de simulación presentada en capítulos anteriores para analizar tres casos de estudio que evidencien su capacidad para:

- Modelar, de forma rápida y sencilla, diversas terminales ferroviarias de contenedores con diferentes funciones, recursos, infraestructuras, layout, reglas de operación, horarios de trabajo y demanda.
- Proporcionar resultados de interés para estudiar el funcionamiento de las terminales modeladas.
- Evaluar, sin necesidad de reprogramar su código inicial, cambios que ayuden a mejorar el funcionamiento de estas terminales (por ejemplo, cambios en los turnos de trabajo de sus recursos o en sus reglas de operación).

En el apartado 8.2, se presentan los tres casos de estudio analizados a lo largo de este capítulo, junto a la metodología empleada para estudiarlos. Posteriormente, en los apartados 8.3, 8.4 y 8.5, se recoge el detalle de cada uno de ellos.

8.2. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN CON LA PLATAFORMA FLEXIBLE DE SIMULACIÓN

Antes de experimentar con la plataforma flexible de simulación, es preciso definir una o varias terminales a estudiar, uno o varios escenarios de demanda y uno o varios objetivos para cada caso de estudio (véase el subapartado 8.2.1). Además, es necesario establecer una metodología que determine cómo van a obtenerse y a analizarse los resultados que se desprenden de la plataforma flexible (véase el subapartado 8.2.2).

8.2.1. CASOS Y OBJETIVOS DE ESTUDIO

En este capítulo, se estudian tres de las múltiples terminales ferroviarias de contenedores que pueden ser modeladas y analizadas usando la plataforma flexible de simulación desarrollada en esta tesis. Estas terminales han sido elegidas a partir del estudio realizado en el capítulo 4, con el objetivo de maximizar el número de diferencias que existen entre ellas.

Las terminales a simular difieren, entre otros aspectos, en sus funciones y en el tipo de recursos y de infraestructuras que presentan. Por ejemplo, según muestran la Tabla 8.1, la terminal estudiada en el caso de estudio 1 realiza operaciones de carga/descarga de trenes y camiones usando un único haz de vías de carga/descarga atendido por grúas móviles y pórtico. La terminal estudiada en el caso de estudio 2 se ocupa de clasificar plataformas, además de intercambiar contenedores entre trenes y camiones. Para realizar esta última tarea, dispone de una zona de carga/descarga con un único haz de vías atendido sólo por grúas móviles. Por último, la terminal estudiada en el caso de estudio 3 trasborda contenedores entre trenes, además de intercambiar contenedores entre trenes y camiones. Ambas operaciones tienen lugar en una zona de carga/descarga donde existen tres haces de vías, dos atendidos por sólo por grúas móviles y otro atendido por grúas móviles y pórtico.

		Caso 1	Caso 2	Caso 3
Funciones	Carga/descarga	X		
	Clasificación + carga/descarga		X	
	Trasbordo + carga/descarga			X
Tipo de recursos y de infraestructuras de la zona de carga/descarga	Haz de vías atendido por grúas móviles y pórtico	X		
	Haz de vías atendido por grúas móviles		X	
	Haz de vías atendido por grúas móviles y pórtico + haz de vías atendido sólo por grúas móviles			X
Cambios sobre la configuración inicial	Cambios en la demanda	Incremento de demanda	X	
		Descenso de demanda		X
		Existencia de trenes largos	X	
	Cambios en las reglas de operación	Cambio en las funciones de las infraestructuras situadas bajo pórtico	X	
		Reasignación de tareas a recursos humanos	X	
		Cambio del criterio empleado para almacenar contenedores	X	
		Reasignación de trenes a haces de vías		X
		Reasignación de grúas móviles a haces de vías		X

Tabla 8.1. Principales diferencias que existen entre los escenarios a analizar en los casos de estudio. Fuente: elaboración propia.

Además de las diferencias identificadas anteriormente, las terminales estudiadas en cada caso de estudio difieren en otras características relativas a su diseño y operación. Estas terminales difieren, por ejemplo, en: el número de grúas

disponibles, la longitud de sus vías de carga/descarga, su layout, sus reglas de operación, sus horarios de trabajo y su demanda (véanse más detalles al comienzo de los apartados 8.3, 8.4 y 8.5 y de los subapartados 8.3.1, 8.4.1 y 8.5.1).

En los subapartados 8.3.1, 8.4.1 y 8.5.1, se analiza el funcionamiento inicial de cada terminal, usando los indicadores sobre nivel de servicio, productividad y uso de recursos e infraestructuras expuestos en el apartado 5.6.

Conocido el funcionamiento inicial de cada terminal, se analizan ciertos cambios sobre su demanda y/o sobre sus reglas de operación (véase la Tabla 8.1). En particular:

- En el subapartado 8.3.2, se pretende determinar si la terminal estudiada en el primer caso de estudio es capaz de satisfacer un nuevo escenario de demanda donde el número de trenes a cargar/descargar es mayor que el inicialmente planteado y donde, además, parte de estos trenes poseen una longitud superior a la de las vías de carga/descarga. Para satisfacer este nuevo plan de trenes, se estudian dos alternativas de operación donde la función de las vías de carga/descarga que están bajo pórtico cambia.
- En el subapartado 8.4.2, se analizan distintos cambios sobre la operación de la segunda terminal considerada como objeto de estudio, con el objetivo de mejorar su nivel de servicio inicial. En este caso, se reduce el número de personas que trabajan en la puerta de entrada/salida de camiones (recursos ociosos), se incrementa el personal que manipula las grúas móviles (cuello de botella) y se cambia la regla utilizada para colocar contenedores en la playa de almacenamiento (con el objetivo de evitar parte de las dobles manipulaciones realizadas por las grúas móviles al extraer contenedores de esta zona).
- En el subapartado 8.5.2, se presenta un nuevo escenario de demanda donde el número de trenes es inferior al inicialmente planteado. A continuación, se evalúa la eliminación de una grúa móvil, así como un cambio en la asignación de los trenes y de las grúas móviles a los haces de vías de carga/descarga, con el propósito de que esta tercera terminal haga un uso más racional de sus recursos e infraestructuras ante la nueva demanda.

Los casos de estudio 1 y 3, donde se analiza el comportamiento de una terminal ante dos escenarios de demanda conocidos de antemano, ilustran el uso de la plataforma flexible como herramienta para estudiar distintos cambios (sobre el diseño y/o la operación de una terminal) identificados al comienzo de un estudio

de simulación. Este uso de la simulación ha sido ampliamente aplicado en la literatura (véase, por ejemplo, Lee et al., 2006; Bugaric y Petrovic, 2007; Ambrosino y Tànfani, 2009 o Vis y van Anholt, 2010).

De forma complementaria, la plataforma flexible puede ser utilizada para iniciar un proceso iterativo que permita ajustar los recursos, las infraestructuras y/o la operación de una terminal a la carga de trabajo existente. En este caso, los resultados de la situación inicial de una terminal pueden ser empleados como punto de partida para identificar nuevas configuraciones de mejora no detectadas al comienzo del estudio de simulación. La identificación de estas configuraciones de mejora daría lugar a nuevas alternativas de diseño y/o de operación a evaluar con ayuda de la plataforma flexible. Este proceso de evaluación y de identificación de nuevas alternativas se repetiría, de forma iterativa, hasta alcanzar una configuración coherente con los criterios de servicio proporcionados por el decisor. Los subapartados 8.3.2 y 8.4.2 ejemplifican este uso de la simulación, no utilizado explícitamente en la literatura revisada en el capítulo 4, pero ya empleado con anterioridad en otros trabajos relacionados con la línea de investigación en la que se enmarca esta tesis (véase, por ejemplo, García Gutiérrez, 2001; García y García, 2012 y García-Hernández y García-Gutiérrez, 2012).

Las configuraciones analizadas a lo largo de estos tres casos de estudio también evidencian la capacidad de la plataforma flexible para modelar terminales con funciones, tipos de recursos y de infraestructuras y reglas de operación no estudiadas previamente por otros autores referenciados en el apartado 4.2. Las cruces rojas que aparecen en la Tabla 8.1 muestran parte de los aspectos que, a pesar de ser relevantes para modelar múltiples terminales reales, no han sido estudiados previamente en la literatura revisada en el capítulo 4.

8.2.2. METODOLOGÍA PARA OBTENER Y ANALIZAR LOS RESULTADOS DE LA PLATAFORMA FLEXIBLE

Para simular cada una de las tres terminales definidas en el subapartado 8.2.1, ha sido necesario aplicar los cinco pasos que se recogen en el apartado 6.7 y que se recuerdan a continuación. En primer lugar, se ha completado la interfaz de usuario con las características de diseño y de operación de cada terminal. En segundo lugar, se han activado los módulos del modelo de simulación necesarios para representar cada nodo. En tercer lugar, se ha reordenado el “display” del modelo de simulación para asignar una nueva ubicación, similar a la de cada sistema real, a los módulos/elementos activos. A continuación, se ha vinculado el

modelo de simulación con la interfaz de usuario. Por último, se ha ejecutado la simulación y se han analizado los resultados que de ella se desprenden.

Como en el apartado 7.5 ("Validación de resultados de la plataforma flexible de simulación"):

- La simulación de cada terminal ha comenzado en vacío y por tanto, ha sido necesario aplicar un tiempo de calentamiento para eliminar el régimen transitorio inicial al que estaban sometidas las variables de salida a estudiar.
- La simulación de cada terminal no ha terminado en vacío para evitar que los valores de las variables de salida recogidos durante los últimos días del período de simulación no fueran representativos.
- Al haber utilizado distribuciones de probabilidad para generar el patrón de llegadas de los camiones y la duración de las distintas tareas de cada terminal, ha sido necesario realizar varias repeticiones para cada configuración a estudiar, cada una de ellas con números aleatorios diferentes, antes de estimar el nivel de servicio, la productividad y el uso de sus recursos e infraestructuras a partir de los indicadores expuestos en el apartado 5.6.
- Para cada configuración a estudiar, se han simulado diez repeticiones y se ha calculado la media, la desviación típica y el coeficiente de variación de cada variable de salida, usando las observaciones obtenidas en cada repetición y las fórmulas que se recogen en la Tabla 7.3 (véase el subapartado 7.5.3). Al igual que en el subapartado 7.5.3, se ha observado que, por lo general, las desviaciones típicas y los coeficientes de variación son pequeños, de tal forma que se ha podido suponer que los valores observados para cada variable de salida son suficientemente representativos como para explicar el funcionamiento de las terminales estudiadas.

El retraso medio en la salida de los trenes por falta de capacidad de la terminal, el porcentaje de camiones que permanecen en la terminal un máximo de 20 ó 30 minutos o el porcentaje de utilización de las grúas móviles respecto a su tiempo disponible son ejemplos de las variables de salida empleadas para analizar el funcionamiento de las terminales estudiadas a lo largo de este capítulo. Para la media de cada una de estas variables de salida, se ha calculado además su intervalo de confianza al 99,5% ($\alpha = 0,005$) a partir de la expresión registrada en la Tabla 8.2. Este porcentaje indica que si se construyesen muchos intervalos de confianza al 99,5% para la media de una variable de salida, cada uno de ellos

basado en diez observaciones de esa variable, la proporción de intervalos que encerrarían a la media real de esa variable sería del 99,5%. Según Banks (1998) y Law (2007), a este 99,5% se le denomina cobertura del intervalo de confianza y en general, suele ser un valor aproximado, ya que los valores observados en cada repetición para las tres variables de salida indicadas al comienzo de este párrafo no suelen distribuirse al 100% como una variable aleatoria normal (asunción realizada para construir los intervalos de confianza).

Intervalo de confianza para la media de x

$$\bar{x} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_x^2}{n}}$$

Siendo:

n: el número de repeticiones simuladas (en este caso, n=10).

x_j : el valor observado de la variable de salida x en la repetición j (en este caso, $1 \leq j \leq 10$).

\bar{x} : la media de los valores observados de x en las n repeticiones ($\bar{x} = \sum_{j=1}^n x_j / n$).

$t_{n-1, 1-\alpha/2}$: el valor de la distribución t-student de n-1 grados de libertad (en este caso, n -

1 = 9) que deja a su derecha una probabilidad de $\alpha/2$ (en este caso, $\alpha/2 = 0,0025$).

σ_x : la estimación de la desviación típica de la población a partir de los valores observados de x en las n repeticiones ($\sigma_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)}$).

Tabla 8.2. Fórmula para calcular el intervalo de confianza para la media de una variable de salida. Fuente: elaboración propia basada en Banks (1998) y Law (2007).

En general, el número de repeticiones simuladas (n=10) ha permitido alcanzar intervalos de confianza estrechos, de ahí que los valores medios de las variables de salida estudiadas hayan podido ser utilizados para estimar el funcionamiento de cada terminal.

Según lo recogido en el apartado 5.6, el funcionamiento de las terminales estudiadas será adecuado si la media de las variables de salida analizadas indica que:

- Todos los trenes salientes cumplen con el horario fijado en el plan de trenes.
- Al menos un 95% de los camiones atendidos presenta un tiempo de estancia igual o inferior a los 20 ó 30 minutos considerados como valor máximo por Ballis et al. (1997) y Ballis y Golias (2002) en sus estudios de simulación relativos a terminales de transporte intermodal.
- El uso de los recursos y de las infraestructuras disponibles se ajusta a la carga de trabajo existente.

Para comparar las variables de salida (por ejemplo, el retraso medio en la salida de los trenes por falta de capacidad de la terminal, el porcentaje de camiones que permanecen en la terminal un máximo de 20 ó 30 minutos o el porcentaje de utilización de las grúas móviles respecto a su tiempo disponible) de dos configuraciones (por ejemplo, de las dos alternativas de operación que se presentan en el subapartado 8.3.2 para satisfacer una misma demanda o de las configuraciones que se plantean en los subapartados 8.4.2 y 8.5.2 como alternativa de mejora para una situación inicial), se ha calculado la diferencia que existe entre los valores observados para cada variable de salida en cada configuración (variable z), aplicando la fórmula que se recoge en la primera columna de la Tabla 8.3. A continuación, se ha determinado la media de z y su intervalo de confianza al 99,5% ($\alpha = 0,005$), empleando la fórmula que se recoge en la segunda columna de la Tabla 8.3 para el cálculo de intervalos de confianza "paired-t".

z - Diferencia de valores de x entre dos configuraciones	Intervalo de confianza "paired-t" para la media de z
$z_j = x_{2j} - x_{1j}$	$\bar{z} \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \cdot \sqrt{\frac{\sigma_z^2}{n}}$
Siendo: x_{2j} : el valor observado de la variable de salida x en la configuración 2 y en la repetición j (en este caso, $1 \leq j \leq 10$). x_{1j} : el valor observado de la variable de salida x en la configuración 1 y en la repetición j (en este caso, $1 \leq j \leq 10$). z_j : la diferencia que existe entre los valores observados de la variable de salida x en las configuraciones 2 y 1 para la repetición j (en este caso, $1 \leq j \leq 10$).	Siendo: n: el número de repeticiones simuladas (en este caso, $n=10$). \bar{z} : la media de los z_j calculados según la fórmula indicada en la columna anterior $(\bar{z} = \sum_{j=1}^n z_j / n)$. $t_{n-1, 1-\alpha/2}$: el valor de la distribución t-student de n-1 grados de libertad (en este caso, $n - 1 = 9$) que deja a su derecha una probabilidad de $\alpha/2$ (en este caso, $\alpha/2 = 0,0025$). σ_z : la estimación de la desviación típica de la población a partir de los valores observados de z en las n repeticiones $(\sigma_z = \sqrt{\sum_{j=1}^n (z_j - \bar{z})^2 / (n - 1)})$.

Tabla 8.3. Fórmulas para calcular z y el intervalo de confianza "paired-t" para la media de z.
Fuente: elaboración propia basada en Banks (1998) y Law (2007).

Según Banks (1998) y Law (2007), los intervalos de confianza "paired-t" para la media de z pueden ser aplicados en situaciones, como las presentadas a lo

largo de este capítulo, esto es, en situaciones donde se ha realizado el mismo número de repeticiones para cada una de las dos configuraciones a comparar (en este caso, diez) y donde se han utilizado los mismos números aleatorios para simular cada pareja de repeticiones (mismos números aleatorios para simular la repetición 1 de ambas configuraciones pero diferentes de los utilizados para simular la repetición 2, etc.).

Banks (1998) y Law (2007) también indican que si el intervalo de confianza para la media de z de una variable de salida no contiene el cero, se puede decir que existe una diferencia estadísticamente significativa entre ambas configuraciones para esa variable. En este caso, la magnitud de dicha diferencia puede ser estimada usando la media de z y su intervalo de confianza. Si, por el contrario, el cero está presente en el intervalo de confianza para la media de z de una variable de salida, no debería considerarse la existencia de una diferencia estadísticamente significativa entre ambas configuraciones para esa variable.

A partir de la solución propuesta por Banks (1998) y Law (2007) para el estudio de configuraciones individuales donde existe más de una variable de salida a analizar (o para la comparación de dos configuraciones donde existe más de una variable de salida a confrontar) se puede calcular un α_{global} , multiplicando el α elegido para construir el intervalo de confianza de cada variable de salida por el número de variables de salida a estudiar. En los casos de estudio analizados a lo largo de este capítulo, α es igual a 0,005, mientras que el número máximo de variables de salida a estudiar suele estar en torno a 20. De tal forma que el α_{global} será del orden de 0,10, siendo $(1 - \alpha_{\text{global}})$ cercano a 0,90 (en tanto por uno) o a 90% (en tanto por cien). Este 90%, usado por Law (2007) en múltiples ejemplos relativos al cálculo de intervalos de confianza para la media de una variable, indica que si se construyesen muchos intervalos de confianza al 99,5% para la media de las distintas variables de salida a analizar de una configuración individual (o para la media de la diferencia de valores de las variables de salida a comparar entre dos configuraciones), cada uno de ellos basado en diez observaciones de cada variable de salida, la proporción de intervalos contruidos que contendrían, de forma simultánea, a la media real de cada variable estaría en torno al $(1 - \alpha_{\text{global}})$ definido anteriormente.

8.3. CASO DE ESTUDIO 1

En este apartado, se utiliza la plataforma flexible para analizar el funcionamiento de una terminal ferroviaria de contenedores ante dos escenarios de

demanda. En el subapartado 8.3.1, se estudia su nivel de servicio, productividad y uso de sus recursos e infraestructuras ante un escenario de demanda inicial. En el subapartado 8.3.2, se estudia su funcionamiento ante un nuevo escenario de demanda donde el número de trenes a cargar/descargar es superior al inicialmente planteado y donde, además, parte de estos trenes poseen una longitud superior a la de las vías de carga/descarga. En este último subapartado, se comparan dos alternativas de operación para satisfacer el nuevo escenario de demanda. Este caso de estudio está basado en el publicado por García y García (2012) como resultado de esta tesis.

La terminal a simular se encarga de cargar/descargar trenes y camiones. Para realizar esta función, dispone de las siguientes infraestructuras y recursos:

- Una puerta para la entrada/salida de camiones.
- Una zona de aparcamiento con capacidad para tres camiones.
- Una vía para la entrada de trenes y otra para su salida.
- Cuatro vías de recepción/expedición de longitud 700 metros.
- Una playa de carga/descarga de camiones que ha sido representada, en el modelo de simulación, por un módulo de carga/descarga con grúas pórtico. Esta playa de carga/descarga dispone, a su vez, de:
 - Una playa de almacenamiento de 6 metros de ancho y 250 metros de largo.
 - Dos grúas pórtico.
 - Cinco vías de carga/descarga bajo pórtico de longitud 400 metros.
 - Dos líneas de almacenamiento bajo pórtico de longitud 400 metros.
 - Dos áreas de carga/descarga de camiones con capacidad para albergar, de forma simultánea, seis camiones en cada una de ellas. Una de estas áreas está cerca de la playa de almacenamiento, mientras que la otra está bajo pórtico.
 - Una grúa móvil, que tiene acceso a la playa de almacenamiento, a una de las líneas de almacenamiento y a las dos áreas de carga/descarga de camiones.
- Un tractor de maniobras.

8.3.1. SITUACIÓN INICIAL

Escenario de demanda inicial y condiciones de operación

La terminal intercambia trenes con otras cinco terminales. La Tabla 8.4 muestra los 11 trenes que entran (E) y los 11 trenes que salen (S) semanalmente, junto a su hora de entrada/salida en/de la terminal y a un indicador numérico que varía entre 1 y 5 para reflejar la terminal de la que proviene cada tren entrante o a la que se dirige cada tren saliente. Los trenes tienen la misma longitud que la de las vías de carga/descarga (400 metros) y transportan, en media, 22 contenedores, siendo el 60% de 40 pies y el 40% restante de 20 pies. En este caso, el 50% de los contenedores transportados están vacíos, mientras que el 50% restante están cargados. Se ha supuesto que el plan de trenes presentado en la Tabla 8.4 tiene una validez de cuatro semanas.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
3:20	E - 1		E - 1		
4:25	E - 2		E - 2		E - 2
5:30		S - 1		S - 1	
5:45		E - 3		E - 3	
6:50	E - 4				
7:20		E - 5		E - 5	E - 5
18:40				S - 4	
19:15		S - 5		S - 5	S - 5
20:20		S - 3		S - 3	
21:05	S - 2		S - 2		S - 2

Tabla 8.4. Caso 1 – Plan de trenes inicial. Fuente: elaboración propia.

La puerta de entrada/salida de camiones está operativa de lunes a viernes de 7:30 a 20:30. Los camiones a cargar/descargar llegan a la terminal dentro de ese horario. Sin embargo, el patrón de llegadas es diferente según el tipo de camiones:

- Los camiones a cargar comienzan a llegar el mismo día en el que se descarga el tren entrante con el que están relacionados. Su llegada es moderada entre las 7:30 y las 9:00, más intensa entre las 9:00 y las 11:00 y moderada, otra vez, entre las 11:00 y las 20:30. En este escenario, no es frecuente encontrar contenedores que esperen en la terminal más de tres días laborables antes de salir en camión.
- Los camiones a descargar comienzan a llegar con un día laborable de antelación respecto a su salida en tren. Su llegada es moderada entre las 9:00 y las 14:00, más intensa entre las 14:00 y las 18:00 y moderada, otra vez, entre las 18:00 y las 20:30.

Para satisfacer esta demanda, la terminal emplea:

- Dos trabajadores por turno de lunes a viernes de 7:00 a 20:30, uno para atender la entrada de camiones y otro para gestionar su salida.
- Un trabajador por turno de lunes a viernes de 7:00 a 21:00 para atender la grúa móvil.
- Dos grúas pórtico de lunes a viernes de 7:00 a 11:00. Trascendido este período pico de trabajo (donde el número de trenes a descargar y el número de camiones a cargar es elevado), sólo trabaja una grúa pórtico hasta las 21:00.
- Un trabajador por turno de lunes a viernes las 24 horas del día para manejar el tractor de maniobras.

El proceso de descarga de los trenes entrantes comienza tan pronto como llegan a la terminal, existe una vía de carga/descarga libre y existe una grúa pórtico disponible. Una vez finalizada esta tarea, los trenes vuelven a cargarse. La carga de los trenes se cierra una hora y media antes de su salida de la terminal. Los contenedores que llegan después de este cierre no son cargados en el tren saliente con el que están relacionados.

De las dos líneas de almacenamiento existentes, una se utiliza para almacenar contenedores que van a salir en tren, mientras que la otra se emplea para colocar contenedores que van a salir en camión. La grúa móvil sólo tiene acceso a la línea donde se colocan los contenedores que van a salir en camión. Cuando la ocupación de esta línea supera el 70% de su capacidad máxima, la grúa móvil mueve contenedores a la playa de almacenamiento, con el objetivo de evitar que la línea se sature y que las grúas pórtico dejen de descargar trenes. En ambas líneas, los contenedores se almacenan hasta dos alturas; mientras que en la playa de almacenamiento, los contenedores pueden llegar a apilarse hasta tres alturas.

Resultados

Se ha simulado el funcionamiento de la terminal durante cuatro semanas, considerando los cuatro primeros días como tiempo de calentamiento. Este tiempo de calentamiento ha permitido eliminar el régimen transitorio inicial al que estaban sometidas las variables de salida estudiadas en este apartado.

Según lo indicado en el subapartado 8.2.2, ha sido necesario ejecutar varias repeticiones de la configuración a estudiar, al haber utilizado distribuciones de probabilidad para generar los tiempos de operación y el patrón de llegadas de los camiones. Usando un ordenador personal Intel Core i5 con 4 Gb de RAM, se ha

tardado 1 hora y 50 minutos en ejecutar cada una de las diez repeticiones realizadas.

Una vez transcurrido el tiempo de calentamiento, la terminal atiende, en media, 754,00 camiones a cargar, 766,00 camiones a descargar, 35,00 trenes entrantes y 35,00 trenes salientes.

La Tabla 8.5 recoge los principales indicadores que han sido utilizados para medir el nivel de servicio de la terminal, el uso de sus recursos e infraestructuras y sus cuellos de botella. Según lo indicado en el subapartado 8.2.2, para cada variable de salida, se muestra la media de los valores observados a lo largo de las diez repeticiones, junto al ancho de su intervalo de confianza al 99,5% (véase la segunda columna de la Tabla 8.5). En general, los intervalos de confianza son estrechos, de tal forma que las medias de las variables de salida estudiadas pueden ser utilizadas para analizar el funcionamiento de este primer escenario.

	I.C. ($\alpha = 0,005$)
Retraso medio para trenes salientes	0,00 \pm 0,00
Proporción camiones atendidos como máximo en 20min	99,47 \pm 0,12
Tiempo medio estancia para camiones a cargar	12,62 \pm 0,04
Tiempo medio estancia para camiones a descargar	11,70 \pm 0,05
Utilización puerta entrada/salida	49,88 \pm 0,06
Utilización vía entrada	0,51 \pm 0,01
Utilización vía salida	0,50 \pm 0,02
Utilización vías expedición/recepción	1,65 \pm 0,01
Utilización vías carga/descarga	25,49 \pm 0,01
Utilización playa almacenamiento	6,05 \pm 2,12
Utilización línea que almacena contenedores que van a salir en tren	51,17 \pm 0,82
Utilización línea que almacena contenedores que van a salir en camión	75,17 \pm 1,82
Utilización grúa pórtico que trabaja de 7:00 a 11:00	39,29 \pm 0,20
Utilización grúa pórtico que trabaja de 7:00 a 21:00	50,91 \pm 0,49
Utilización grúa móvil	17,68 \pm 0,30
Utilización tractor maniobras	1,42 \pm 0,01
Proporción camiones que esperan antes de entrar	30,71 \pm 0,65
Tiempo medio de espera antes de entrar	1,82 \pm 0,05
Proporción camiones que esperan antes de salir	18,84 \pm 0,74
Tiempo medio de espera antes de salir	1,00 \pm 0,04

Tabla 8.5. Caso 1 – Indicadores de funcionamiento para la situación inicial (tiempos en minutos, proporciones y utilizaciones en porcentaje). Fuente: elaboración propia.

A la vista de estos resultados, se puede decir que la terminal es capaz de satisfacer el plan de trenes sin generar retrasos en su salida, además de ser capaz de atender al 99,47% de los camiones en un tiempo máximo de 20min. En este escenario, el tiempo medio de estancia para los camiones a cargar es de 12,62min, mientras que el tiempo medio de estancia para los camiones a descargar es de 11,70min.

Este buen nivel de servicio se debe a la existencia de recursos y de infraestructuras ociosas (véase, por ejemplo, la utilización de las vías, de las grúas o del tractor de maniobras en la Tabla 8.5).

Sin embargo, a pesar de esta disponibilidad de recursos y de infraestructuras en valores medios, la simulación revela momentos puntuales donde aparecen picos de trabajo. Por ejemplo, existen momentos donde la llegada de varios camiones coincide o donde un camión llega cuando la puerta de entrada está ocupada, de tal forma que, en media, el 30,71% de los camiones atendidos esperan un tiempo medio de 1,82min antes de entrar en la terminal (véase la Tabla 8.5). De forma similar, existen momentos donde varios camiones terminan de ser atendidos a la vez o donde un camión termina de ser atendido cuando la puerta de salida está ocupada, de tal forma que, en media, el 18,84% de los camiones esperan un tiempo medio de 1,00min antes de salir (véase la Tabla 8.5). La simulación ha permitido revelar también que las mayores esperas se producen entre las 9:00 y las 11:00 y entre las 14:00 y las 18:00, cuando el flujo de camiones a cargar y a descargar aumenta. Durante estos periodos, se han observado colas de espera máximas de hasta 4,00 camiones antes de entrar en la terminal, tiempos de espera máximos de hasta 8,25min antes de entrar, colas de espera máximas de hasta 2,00 camiones antes de salir y tiempos de espera máximos de hasta 3,69min antes de salir.

Las grúas pórtico también sufren picos de trabajo entre las 14:00 y las 18:00, ya que el flujo de camiones a descargar cerca de las vías aumenta cuando sólo existe una grúa pórtico en uso. Estos picos de trabajo ocasionan que, en media:

- Aumente el número de camiones que esperan de forma simultánea cerca de las vías de carga/descarga para ser atendidos. La simulación revela que hasta 5,00 camiones llegan a esperar de forma simultánea cerca de las vías entre las 14:00 y las 18:00.
- 8,00 de los 760,00 camiones descargados por las grúas pórtico cerca de las vías (un 0,53% del total de los camiones descargados) esperen un tiempo suficiente hasta ser atendidos como para que su tiempo de estancia llegue a superar los 20min considerados por Ballis y Golias (2002) como tiempo máximo de estancia permisible para un camión dentro una terminal ferroviaria.

Adicionalmente, la línea dedicada a almacenar contenedores que van a salir en camión llega a ocuparse por encima del 70% de su capacidad máxima entre las 9:00 y las 10:00 (véase la Tabla 8.5), de tal forma que las grúas móviles deben mover contenedores a la playa de almacenamiento para evitar posibles paradas de las grúas pórtico durante la descarga de los trenes entrantes. En este escenario, el

uso de las líneas de almacenamiento es superior al de otros elementos (véase, por ejemplo, la utilización de las vías o de las grúas en la Tabla 8.5), debido a su uso preferente frente a la playa de almacenamiento y debido a que sólo el 15,15% de los contenedores manipulados se intercambian directamente entre trenes y camiones.

Parte de los cuellos de botella identificados anteriormente podrían ser mitigados, si se considerara oportuno, aumentando, por ejemplo, el número de puertas de entrada/salida de camiones y el número de grúas pórtico que trabajan en paralelo durante los períodos pico de trabajo. Para obtener resultados sobre estas nuevas configuraciones, el usuario de la plataforma flexible sólo tendría que actualizar los cambios indicados anteriormente en la interfaz de usuario y volver a ejecutar la simulación.

8.3.2. SITUACIÓN CON DEMANDA INCREMENTADA

Plan de trenes con demanda incrementada

En este subapartado, se estudia si la terminal anterior es capaz de hacer frente a un nuevo escenario de demanda, donde el número de trenes a cargar/descargar es superior al inicialmente plateado y donde, además, parte de estos trenes poseen una longitud superior a la de las vías de carga/descarga.

La Tabla 8.6 muestra los 14 trenes que entran (E) y los 14 trenes que salen (S) semanalmente en este nuevo escenario de demanda. Los nuevos trenes aparecen marcados en rojo en la Tabla 8.6.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
3:20	E - 1		E - 1		
4:25	E - 2	E - 2	E - 2	E - 2	E - 2
5:30		S - 1		S - 1	
5:45		E - 3		E - 3	
6:50	E - 4		E - 4		
7:20		E - 5		E - 5	E - 5
18:40	S - 4		S - 4		
19:15		S - 5		S - 5	S - 5
20:20		S - 3		S - 3	
21:05	S - 2	S - 2	S - 2	S - 2	S - 2

Tabla 8.6. Caso 1 – Plan de trenes con demanda incrementada. Fuente: elaboración propia.

En este escenario, todos los trenes tienen la misma longitud que las vías de carga/descarga (400 metros), salvo los trenes entrantes/salientes relacionados con el destino 3, cuya longitud ha pasado a ser de 600 metros. Las plataformas transportadas por estos últimos trenes (marcados en azul en la Tabla 8.6.) tendrán que ser repartidas en dos vías de carga/descarga para ser atendidas.

El número medio de contenedores que transportan los trenes de 400 metros sigue estando en torno a 22, mientras que los trenes de 600 metros transportan, en media, 37 contenedores. En ambos casos, la proporción de contenedores de 20/40 pies y de contenedores cargados/vacíos sigue siendo la misma que en el subapartado 8.3.1. Al igual que en el subapartado 8.3.1, se ha considerado que la validez de este plan de trenes es de cuatro semanas.

Resultados de la configuración inicial y presentación de nuevas configuraciones

En primer lugar, se ha simulado el nuevo plan de trenes sin modificar el patrón de llegadas de los camiones, los turnos de trabajo, las reglas de operación, el tiempo de simulación, el tiempo de calentamiento y el número de repeticiones definidos en el subapartado 8.3.1.

Los resultados de la simulación han permitido identificar que, una vez transcurrido el tiempo de calentamiento, la terminal atiende, en media, 1097,10 camiones a cargar (343,10 camiones a cargar más que en el subapartado 8.3.1), 1064,00 camiones a descargar (298,00 camiones a descargar más que en el subapartado 8.3.1) y 88,00 trenes (18,00 trenes más que en el subapartado 8.3.1), de los cuales 76,00 son de 400 metros y 12,00 de 600 metros.

Los resultados de la simulación también han permitido identificar que la terminal no es capaz de atender la nueva demanda proporcionando niveles de servicio aceptables. En este caso, ciertos trenes salen de la terminal después de lo fijado en el plan de trenes por falta de capacidad de la terminal. Además, más del 5% de los camiones atendidos permanecen en la terminal un tiempo superior a los 20 ó 30 minutos considerados, respectivamente, por Ballis y Golias (2002) y por Ballis et al. (1997) como tiempo máximo de estancia permisible.

Los problemas identificados anteriormente se deben a la saturación de las grúas pórtico. De ahí que, en adelante, se haya incrementado su disponibilidad, haciendo que los dos pórtico trabajen de 7:00 a 21:00 (en el subapartado 8.3.1, una grúa pórtico trabajaba de 7:00 a 21:00, mientras que la otra trabajaba de 7:00 a 11:00). En paralelo a este cambio, se ha modificado, ligeramente, el patrón de llegadas de los camiones a descargar para que los contenedores entrantes en la red ferroviaria lleguen, como mínimo, dos horas antes de su salida en tren y no una hora y media antes de su salida, como ocurría en el subapartado 8.3.1. Este último cambio permitirá reducir parte de los picos de trabajo que presentan las grúas pórtico cerca de la hora de salida de los trenes.

Tras simular el funcionamiento de la terminal con estas nuevas condiciones de operación, se ha comprobado que la terminal es capaz de satisfacer la nueva demanda proporcionando niveles de servicio similares a los indicados en el subapartado 8.3.1. Los resultados de la simulación también han permitido identificar un aumento en los picos de trabajo de la puerta de entrada/salida respecto a lo observado en el subapartado 8.3.1. Este aumento se debe al haber incrementado el número de camiones a atender sin realizar grandes modificaciones sobre su patrón de llegadas para no alterar, en gran medida, las preferencias iniciales de los clientes. Del mismo modo, se ha visto incrementado el uso de las zonas de almacenamiento. En particular, la línea dedicada a almacenar contenedores que van a salir en camión llega a ocuparse de lunes a viernes por encima del 70% de su capacidad máxima, lo que hace que la grúa móvil tenga que mover contenedores desde esta línea a la playa de almacenamiento, con el objetivo de evitar que las grúas pórtico dejen de descargar trenes. La línea dedicada a almacenar contenedores que van a salir en tren también llega a saturarse en ciertos momentos, de tal forma que parte de los contenedores que van a salir en tren tengan que ser colocados en la playa de almacenamiento.

En vista de estos resultados, se han identificado dos configuraciones alternativas para satisfacer la demanda. Estas configuraciones difieren en los siguientes aspectos:

- Configuración 1. Al igual que en el subapartado 8.3.1, en esta primera configuración, existen cinco vías de carga/descarga bajo pórtico (una para cada origen/destino de carga) y dos líneas de almacenamiento (una línea para almacenar contenedores que van a salir en camión y otra para almacenar contenedores que van a salir en tren). La grúa móvil tiene acceso a la línea donde se almacenan los contenedores que van a salir en camión, pero no a la línea donde se almacenan los contenedores que van a salir en tren.
- Configuración 2. Esta configuración introduce un cambio sobre la función inicial de dos vías de carga/descarga. Tras estudiar el plan de trenes recogido en la Tabla 8.6, se puede comprobar que sólo se utilizan cuatro de las cinco vías de carga/descarga disponibles de forma simultánea. Por tanto, podría utilizarse una vía para atender dos destinos de carga y la vía sobrante para almacenar contenedores, en concreto, para almacenar contenedores que van a salir en camión, con el objetivo de reducir el número de movimientos realizados por las grúas móviles entre las líneas y la playa de almacenamiento a primera hora de la mañana (esta práctica ha

sido observada en terminales españolas con grandes volúmenes de trabajo). De esta forma, en esta segunda configuración, existirían cuatro vías para descargar/cargar trenes, una vía de carga/descarga para almacenar contenedores que van a salir en camión, una línea de almacenamiento para colocar también contenedores que van a salir en camión y otra línea para albergar contenedores que van a salir en tren. Al igual que en el subapartado 8.3.1, la grúa móvil tendría acceso a los contenedores que van a salir en camión, pero no a la línea donde se almacenan los contenedores que van a salir en tren.

Comparación de configuraciones

Tras identificar las dos configuraciones presentadas anteriormente, se ha simulado cada una de ellas usando el mismo tiempo de simulación, el mismo tiempo de calentamiento y el mismo número de repeticiones que en el subapartado 8.3.1.

Para comparar las variables de salida de ambas configuraciones, se han empleado intervalos de confianza "paired-t" (las fórmulas utilizadas para su cálculo pueden encontrarse en el subapartado 8.2.2, así como en Banks, 1998 y en Law, 2007). Para cada variable de salida estudiada, la Tabla 8.7 recoge: la media de los valores obtenidos tras simular las diez repeticiones de la configuración 2 (véase su segunda columna); la media de los valores obtenidos tras simular las diez repeticiones de la configuración 1 (véase su tercera columna); la media de la diferencia entre los valores observados en la configuración 2 y en la configuración 1 para cada repetición, junto a su intervalo de confianza "paired-t" al 99,5% (véase su cuarta columna); y una última columna donde se indica si los valores de las variables de salida estudiadas presentan una diferencia estadísticamente significativa entre las dos configuraciones comparadas. Según lo indicado en el subapartado 8.2.2, si, para una variable de salida, el intervalo de confianza recogido en la cuarta columna de la Tabla 8.7 no contiene el cero, se puede decir que el valor de esa variable presenta una diferencia estadísticamente significativa entre las dos configuraciones comparadas. Si, por el contrario, el intervalo de confianza contiene el cero, no puede considerarse que exista una diferencia estadísticamente significativa entre ambas configuraciones para esa variable de salida.

	Conf.2 \bar{x}_2	Conf.1 \bar{x}_1	Conf.2 - Conf.1 I.C.-p ($\alpha=0,005$)	Conf.2 \neq Conf.1
Retraso medio para trenes salientes	0,00	0,00	0,00 \pm 0,00	No
Proporción camiones atendidos como máximo en 20min	99,50	99,47	0,03 \pm 0,20	No
Tiempo medio estancia para camiones a cargar	12,83	12,98	-0,15 \pm 0,07	Sí
Tiempo medio estancia para camiones a descargar	11,94	11,96	-0,02 \pm 0,11	No
Utilización playa de almacenamiento	5,75	17,25	-11,50 \pm 2,82	Sí
Utilización grúa móvil	25,52	29,41	-3,89 \pm 0,33	Sí
Utilización grúa pórtico 1	42,30	40,97	1,33 \pm 0,50	Sí
Utilización grúa pórtico 2	39,82	39,04	0,78 \pm 0,39	Sí

Tabla 8.7. Caso 1 – Comparación de indicadores para las configuraciones 2-1 (tiempos en minutos, proporciones y utilizaciones en porcentaje). Fuente: elaboración propia.

Los resultados de las simulaciones indican niveles de servicio aceptables para ambas configuraciones. Las dos primeras filas de la Tabla 8.7 revelan que, en ambos casos, no existen retrasos en la salida de los trenes y que más del 95% de los camiones son atendidos en un tiempo máximo de 20min. La tercera y cuarta fila de la Tabla 8.7 indican que el tiempo de estancia de los camiones a cargar es, en media, 0,15 minutos menor en la configuración 2 que en la configuración 1; mientras que el tiempo de estancia para los camiones a descargar no presenta variaciones significativas entre ambas configuraciones, al estar el cero presente en el cuarto intervalo de confianza.

Las dos configuraciones a comparar presentan diferencias estadísticamente significativas en el uso de las zonas de almacenamiento y de las grúas. Según la cuarta columna de la Tabla 8.7, la playa de almacenamiento se utiliza, en media, un 11,50% menos en la configuración 2 que en la configuración 1, la grúa móvil trabaja un 3,89% menos en la configuración 2 que en la configuración 1, mientras que las grúas pórtico se emplean un 1,33% y un 0,78% más en la configuración 2 que en la configuración 1. Estos resultados son coherentes con el hecho de que la configuración 2 posee más capacidad de almacenamiento cerca de las vías de carga/descarga que la configuración 1, lo que hace que todos los contenedores que son descargados de los trenes puedan almacenarse cerca de estas vías sin necesidad de que la grúa móvil tenga que mover una parte a la playa de almacenamiento (como ocurre en la configuración 1). Las grúas pórtico se utilizan algo más en la configuración 2 que en la configuración 1, ya que, en esta segunda configuración, son capaces de cargar camiones con los contenedores que esperan en la vía de carga/descarga empleada para su almacenamiento. Esto hace que, en la configuración 2, las grúas pórtico puedan cargar camiones, mientras que la grúa móvil está ocupada con otras tareas (por ejemplo, descargando camiones en las proximidades de la playa de almacenamiento). El resto de infraestructuras y de recursos no presentan diferencias estadísticamente significativas entre las dos configuraciones comparadas, de ahí que no se hayan incluido en la Tabla 8.7.

En vista de estos resultados, puede decirse que ambas configuraciones presentan buenos niveles de servicio. Sin embargo, el uso de la grúa móvil es menor en la configuración 2, al realizar menos movimientos entre la playa y las líneas de almacenamiento. Esto hace que los costes por operación/mantenimiento de este recurso (consumo de baterías, cambio de ruedas, etc.) puedan ser menores en esta segunda configuración, además de poder utilizar su capacidad ociosa para cargar más camiones si hubiera nuevos incrementos de demanda. Por ejemplo, si los trenes entrantes transportaran, en media, un 20% más de contenedores y los nuevos camiones a cargar llegaran entre las 8:30 y las 10:30, la configuración 2 sería especialmente interesante, al poder utilizar la grúa móvil para cargar camiones sin influir negativamente en la descarga de los trenes, cuyos contenedores podrían ser colocados en la línea de almacenamiento o en la vía de carga/descarga dedicadas para este propósito, sin necesidad de ser transportados a la playa de almacenamiento por la grúa móvil. Ante un incremento de demanda similar, la grúa móvil de la configuración 1 tendría que desatender la carga de ciertos camiones para mover contenedores desde la línea a la playa de almacenamiento y así evitar que la descarga de ciertos trenes se paralizara.

8.4. CASO DE ESTUDIO 2

Este apartado se estructura en dos subapartados. En el subapartado 8.4.1, se evalúa el funcionamiento de una terminal dado un plan de trenes, mientras que, en el subapartado 8.4.2, se analizan distintos cambios sobre su operación para mejorar su funcionamiento inicial. La metodología aplicada para identificar y evaluar estos cambios está basada en el caso de estudio publicado por García-Hernández y García-Gutiérrez (2012) como resultado de esta tesis.

A diferencia de lo visto en el apartado 8.3, la terminal considerada como objeto de estudio en este apartado se encarga de clasificar plataformas y de cargar/descargar trenes y camiones, utilizando únicamente grúas móviles para realizar esta última función.

La terminal analizada en este caso de estudio también difiere de la terminal estudiada en el apartado 8.3 en otros aspectos de diseño relativos a sus infraestructuras y recursos (existencia o no de vías de recepción/expedición, número de vías de carga/descarga, etc.). En particular, la terminal a simular en este apartado dispone de las siguientes infraestructuras y recursos:

- Una zona de clasificación que ha sido representada, en el modelo de simulación, por el módulo de clasificación. Esta zona dispone de:

- Una única vía para la entrada/salida de trenes, que conecta la zona de clasificación con la red ferroviaria.
- Ocho vías de clasificación de longitud 600 metros, que se emplean para formar nuevos trenes salientes a partir de las plataformas transportadas por varios trenes entrantes. Las vías de clasificación también se utilizan para recibir/expedir trenes que entran/salen a/de la zona de carga/descarga, ya que esta última zona carece de vías de recepción/expedición.
- Una zona de carga/descarga de trenes y camiones, compuesta por:
 - Una puerta de entrada/salida de camiones.
 - Una zona de aparcamiento con capacidad para dos camiones.
 - Una única vía para la entrada/salida de trenes, que conecta la zona de carga/descarga con la zona de clasificación.
 - Una playa de carga/descarga de trenes y camiones que ha sido representada, en el modelo de simulación, por un módulo de carga/descarga sin grúas pórtico. Esta playa dispone de:
 - Una playa de almacenamiento de 8 metros de ancho y 450 metros de largo.
 - Una vía de carga/descarga de longitud 450 metros.
 - Un área de carga/descarga de camiones situada en las proximidades de la playa de almacenamiento y otra al lado de la vía de carga/descarga, donde pueden esperar, de forma simultánea, un máximo de diez camiones en cada una de ellas.
 - Dos grúas móviles.
- Un tractor de maniobras.

8.4.1. SITUACIÓN INICIAL

Escenario de demanda y condiciones de operación

La Tabla 8.8 muestra la hora de entrada/salida de los 20 trenes entrantes (E) y de los 20 trenes salientes (S) que la terminal atiende semanalmente, junto a un indicador numérico que varía entre 1 y 4 y que refleja la terminal de la que proviene cada tren entrante o a la que se dirige cada tren saliente. En este caso de

estudio, se ha supuesto que el plan de trenes presentado en la Tabla 8.8 tiene una validez de dos semanas.

	Lunes			Martes			Miércoles			Jueves			Viernes			Sábado		
1:07	E	-	1	E	-	1	E	-	1	E	-	1	E	-	1			
3:43	E	-	2	E	-	2	E	-	2	E	-	2	E	-	2			
6:54	E	-	3	E	-	3	E	-	3	E	-	3	E	-	3			
7:10				S	-	1	S	-	1	S	-	1	S	-	1	S	-	1
9:02	E	-	4	E	-	4	E	-	4	E	-	4	E	-	4			
13:46	S	-	4	S	-	4	S	-	4	S	-	4	S	-	4			
22:00	S	-	3	S	-	3	S	-	3	S	-	3	S	-	3			
23:18	S	-	2	S	-	2	S	-	2	S	-	2	S	-	2			

Tabla 8.8. Caso 2 – Plan de trenes. Fuente: elaboración propia.

Según muestra la Tabla 8.8, la terminal recibe un tren E-1, E-2 y E-3 de lunes a viernes. A su entrada en la zona de clasificación, sus plataformas son colocadas en vías de clasificación diferentes según su próximo destino. Por ejemplo, las plataformas del tren E-1 serán clasificadas en tres vías. Según lo indicado en la Figura 8.1, un primer lote de plataformas se colocará en una vía reservada para formar el tren S-3, otro segundo lote se colocará en una vía reservada para formar el tren S-2 y otro tercer lote se colocará en una vía reservada para agrupar las plataformas de los trenes E-1, E-2 y E-3 que deben pasar por la zona de carga/descarga (para ser descargadas y vueltas a cargar) antes de salir en los trenes S-1, S2 y S-3. La Tabla 8.8 también muestra que la terminal recibe un tren E-4 de lunes a viernes. Tan pronto como este tren entra en la zona de clasificación, sus plataformas son transportadas por el tractor de maniobras a la zona de carga/descarga, donde serán descargadas y cargadas de nuevo (véase, en la Figura 8.1, el movimiento de plataformas grises desde la zona de clasificación a la zona de carga/descarga). Tras realizar estas operaciones, las plataformas cargadas se envían a la zona de clasificación, donde esperan hasta su salida de la terminal (véase, en la Figura 8.1, el movimiento de plataformas rojas desde la zona de carga/descarga a la zona de clasificación y la salida del tren S-4). Tan pronto como el tren E-4 deja libre la vía de carga/descarga, se mueven, hacia la zona de carga/descarga, las plataformas de los trenes E-1, E-2 y E-3 que estaban esperando en la zona de clasificación para ser descargadas y cargadas de nuevo (véase, en la Figura 8.1, el movimiento de plataformas amarillas desde la zona de clasificación a la zona de carga/descarga). Tras ser atendidas, estas plataformas se vuelven a mover a la zona de clasificación, donde son clasificadas según su próximo destino (S-1, S-2 y S-3) y donde esperan hasta su salida de la terminal (véase, en la Figura 8.1, el movimiento de plataformas azules, verdes y naranjas desde la zona de carga/descarga a la zona de clasificación y la salida los trenes S-1, S-2 y S-3).

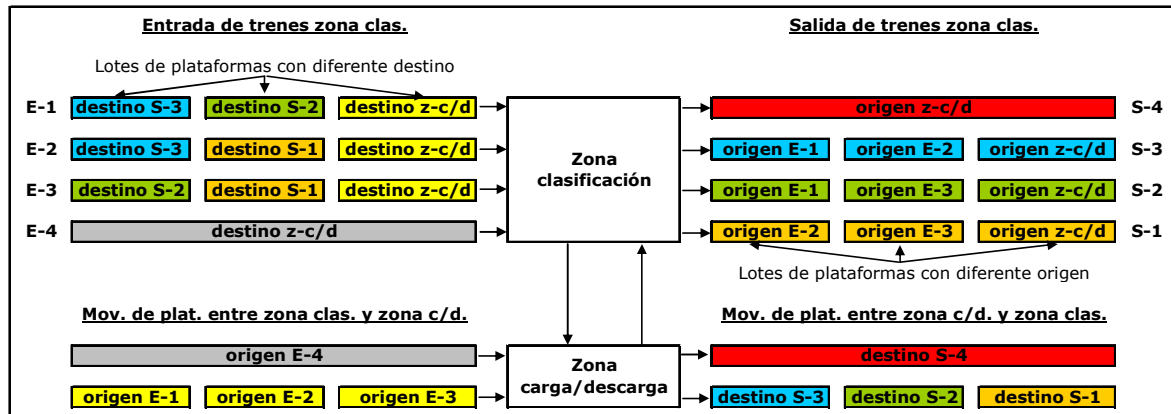


Figura 8.1. Caso 2- Origen/destino de los trenes y de los lotes de plataformas que entran/salen en/de las zonas de clasificación y de carga/descarga. Fuente: elaboración propia.

En este caso de estudio, la terminal manipula trenes con distintas longitudes. La última fila y la última columna de la Tabla 8.9 muestran la longitud de cada tren entrante/saliente, medida en número de plataformas de 60 pies y en metros (véase que, en este caso, todos los trenes tienen una longitud inferior a la de las vías de carga/descarga). Las casillas interiores de esta tabla recogen el número de plataformas que cada tren entrante entrega a cada saliente. Por ejemplo, la primera fila de la Tabla 8.9 indica que 6 de las 20 plataformas del tren E-1 serán colocadas en el tren S-1 (después de haberlas descargado y cargado en la zona de carga/descarga), 10 plataformas de E-1 serán colocadas en S-2, mientras que las 4 plataformas restantes de E-1 serán colocadas en S-3.

	S-1	S-2	S-3	S-4	Longitud tren E
E-1	6	10	4	---	20plat./366m
E-2	10	6	8	---	24plat./439m
E-3	4	8	6	---	18plat./329m
E-4	---	---	---	20	20plat./366m
Longitud tren S	20plat./366m	24plat./439m	18plat./329m	20plat./366m	---

Tabla 8.9. Caso 2 – Longitud de los trenes entrantes/salientes (en nº de plataformas de 60 pies y metros) y número de plataformas que cada tren entrante entrega a cada tren saliente. Fuente: elaboración propia.

La composición de los trenes también es diferente respecto a la indicada en el apartado 8.3. En este caso de estudio, los trenes entrantes/salientes transportan, en media, 15 contenedores, siendo el 50% de 40 pies, el 15% de 30 pies y el 35% restante de 20 pies. En este caso, el 60% de los contenedores transportados están vacíos, mientras que el 40% restante están cargados.

Al igual que en el apartado 8.3, la tasa de llegadas de los camiones varía de forma aleatoria. Sin embargo, en este caso de estudio:

- La puerta de entrada/salida de camiones sólo está operativa de lunes a viernes de 8:00 a 15:00, lo que condiciona la llegada de camiones.

- Los camiones a cargar comienzan a llegar el mismo día en el que se descarga el tren entrante con el que están relacionados, no siendo frecuente encontrar contenedores que esperen en la terminal más de dos días laborables antes de salir en camión.
- Los camiones a descargar comienzan a llegar con un día laborable de antelación respecto a su salida en tren. Los contenedores que lleguen con menos de una hora de antelación respecto a la salida del tren con el que están relacionados no serán cargados.

Para satisfacer esta demanda, la terminal:

- Emplea un trabajador de lunes a viernes de 8:00 a 15:00 para gestionar la entrada de camiones y otro, con el mismo turno, para gestionar su salida.
- Utiliza un trabajador por turno de lunes a viernes de 8:00 a 20:00 para manipular una de las dos grúas móviles disponibles. La otra grúa móvil no se utiliza.
- Dispone de un trabajador por turno para manejar el tractor de maniobras de lunes a viernes las 24 horas del día.
- Apila los contenedores hasta un máximo de dos alturas en la playa de almacenamiento.

Resultados

Se ha simulado el funcionamiento de la terminal durante dos semanas, considerando los dos primeros días como tiempo de calentamiento. Al igual que en el apartado 8.3, se han realizado diez repeticiones antes de estimar el valor de las variables de salida a estudiar.

Una vez transcurrido el tiempo de calentamiento, la zona de clasificación recibe, en media, 32,00 trenes entrantes procedentes de las terminales 1, 2, 3 y 4, expide 33,00 trenes salientes hacia las terminales 1, 2, 3 y 4 y clasifica 640,00 plataformas. Durante ese mismo período, en la zona de carga/descarga, se cargan 244,00 camiones, se descargan 240,00 camiones y se descargan/cargan 16,00 lotes de plataformas (8,00 con origen/destino la terminal 4 y 8,00 con origen/destino las terminales 1, 2 y 3).

La segunda columna de la Tabla 8.10 muestra un resumen de los restantes indicadores utilizados para evaluar el funcionamiento de esta configuración. Cada variable de salida aparece representada por la media de los valores observados en

las diez repeticiones realizadas y por el ancho de su intervalo de confianza al 99,5% ($\alpha = 0,005$). Como en el apartado 8.3, en general, los intervalos de confianza son estrechos, lo que ha permitido utilizar los valores medios calculados para estudiar el funcionamiento de la terminal.

	Conf.1 I.C. ($\alpha=0,005$)	Conf.2 - Conf.1 I.C.-p ($\alpha=0,005$)	Conf.3 - Conf.1 I.C.-p ($\alpha=0,005$)
Proporción trenes salientes con retraso	24,24 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00	-24,24 \pm 0,00
Retraso medio para trenes salientes	95,90 \pm 3,32	-0,87 \pm 5,68	-95,90 \pm 3,32
Proporción camiones atendidos como máximo en 20min	81,24 \pm 2,03	1,20 \pm 4,75	18,29 \pm 2,14
Proporción camiones atendidos como máximo en 30min	93,14 \pm 1,67	1,65 \pm 2,76	6,86 \pm 1,67
Tiempo medio estancia para camiones a cargar	14,60 \pm 0,37	-0,38 \pm 0,53	-4,16 \pm 0,38
Tiempo medio estancia para camiones a descargar	13,62 \pm 0,74	-0,18 \pm 1,45	-5,88 \pm 0,78
Proporción camiones que esperan antes de entrar	15,64 \pm 0,36	35,64 \pm 1,83	29,79 \pm 1,77
Tiempo medio de espera antes de entrar	1,16 \pm 0,03	0,57 \pm 0,05	0,61 \pm 0,15
Proporción camiones que esperan antes de salir	1,96 \pm 0,67	29,42 \pm 1,62	36,74 \pm 1,58
Tiempo medio de espera antes de salir	0,12 \pm 0,03	0,65 \pm 0,09	1,37 \pm 0,12
Utilización trabajador 1 puerta entrada/salida	23,23 \pm 0,11	14,40 \pm 0,09	14,40 \pm 0,09
Utilización trabajador 2 puerta entrada/salida	14,40 \pm 0,09	---	---
Utilización grúa móvil 1	60,64 \pm 0,37	-0,14 \pm 0,31	-20,38 \pm 0,33
Utilización grúa móvil 2	---	---	42,72 \pm 0,40
Utilización tractor maniobras	25,01 \pm 0,24	0,00 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Utilización vía entrada/salida zona carga/descarga	0,93 \pm 0,03	0,00 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Utilización vías carga/descarga	21,17 \pm 0,28	-0,04 \pm 0,26	-2,75 \pm 0,13
Utilización vía entrada/salida zona clasificación	2,82 \pm 0,06	0,00 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Utilización vías clasificación	30,37 \pm 0,01	0,00 \pm 0,00	-0,21 \pm 0,01
Utilización playa almacenamiento	24,65 \pm 0,23	0,26 \pm 0,30	-0,10 \pm 0,28
Proporción contenedores a cargar en camión que requieren dobles manipulaciones para ser extraídos de la playa	25,93 \pm 1,00	0,13 \pm 1,71	33,15 \pm 3,87

Tabla 8.10. Caso 2 – Indicadores de funcionamiento para la configuración 1 y comparación de indicadores para las configuraciones 2-1 y 3-1 (tiempos en minutos, proporciones y utilizaciones en porcentaje). Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la simulación revelan que:

- La terminal no es capaz de satisfacer el plan de trenes sin generar retrasos en su salida. La segunda columna de la Tabla 8.10 indica que, en media, el 24,24% de los trenes (8,00 de los 33,00 trenes expedidos por la zona de clasificación) salen con un retraso medio de 95,90min. A partir del fichero de resultados empleado para recoger, de forma textual, parte de las incidencias que pueden ocurrir durante la simulación, se ha podido comprobar que todos los trenes que tienen por destino la terminal 4 salen con retraso. Por el contrario, los trenes que tienen por destino las terminales 1, 2 y 3 siempre salen a tiempo.
- La terminal tampoco es capaz de atender un porcentaje de camiones igual o superior al 95% en un tiempo máximo de 20 ó 30min. La segunda columna de la Tabla 8.10 indica que, en media, el 81,24% de los camiones es atendido en un tiempo máximo de 20min, mientras que el 93,14% es atendido en un tiempo máximo de 30min. Para esta configuración, se sabe también que el tiempo medio de estancia para los camiones a cargar es de 14,60min, mientras que el tiempo medio para estancia de los camiones a descargar es de 13,62min.

- Los problemas identificados anteriormente se producen sólo por las mañanas y se deben a que, durante este período, aparecen picos de trabajo que impiden a la grúa móvil cumplir con el nivel de servicio fijado para los trenes y para los camiones. De 8:00 a 15:00, la grúa móvil debe atender la carga/descarga de todos los camiones que llegan a la terminal, además de descargar las plataformas de los trenes E-4 y de volverlas a cargar con los contenedores que saldrán en los trenes S-4. De 15:00 a 20:00, la carga de trabajo a la que está sometida la grúa móvil es menor, ya que la puerta de entrada/salida permanece cerrada y por tanto, la grúa móvil sólo tiene que ocuparse de descargar parte de las plataformas transportadas por los trenes E-1, E-2 y E-3 y de volverlas a cargar con los contenedores que saldrán en los trenes S-1, S-2 y S-3.
- La entrada/salida de camiones es bastante fluida, aunque existen momentos puntuales donde la llegada de varios camiones coincide o donde un camión llega cuando el trabajador encargado de gestionar su entrada está ocupado. La segunda columna de la Tabla 8.10 muestra que el 15,64% de los camiones atendidos esperan fuera de la terminal durante un tiempo medio de 1,16min antes de entrar. La puerta de entrada/salida también genera mínimas esperas antes de que los camiones salgan de la terminal. La segunda columna de la Tabla 8.10 indica que, en media, sólo el 1,96% de los camiones llega a la puerta cuando el trabajador encargado de gestionar su salida está ocupado. En este caso, los camiones tienen que esperar un tiempo medio de 0,12min antes de ser atendidos.
- El porcentaje de utilización de la grúa móvil es bastante superior, en media, al de otros recursos e infraestructuras de la terminal. La segunda columna de la Tabla 8.10 muestra que la grúa móvil se utiliza, en media, un 60,64% de su tiempo disponible; mientras que, por ejemplo, la persona encargada de gestionar la entrada de camiones (trabajador 1 de la puerta de entrada/salida) está operativa un 23,23% y la persona encargada de gestionar la salida de camiones (trabajador 2 de la puerta de entrada/salida) trabaja un 14,40%.

8.4.2. ALTERNATIVAS DE MEJORA

En este subapartado, se ilustra cómo la plataforma flexible puede ser utilizada para iniciar un proceso iterativo que permita ajustar la operación de la terminal a la demanda. Este proceso iterativo toma como punto de partida los resultados de la situación inicial, con el objetivo de identificar una o varias

configuraciones alternativas que puedan mejorar su funcionamiento sin variar el número de recursos y de infraestructuras existentes. En este caso, se han identificado dos alternativas de mejora para ajustar los recursos humanos de la terminal a la carga de trabajo existente y con ello, mejorar su nivel de servicio. Estas alternativas, se implementarán y valorarán de forma incremental. En primer lugar (configuración 2), se eliminará una de las dos personas que trabajan en la puerta de entrada/salida de camiones (recurso ocioso). A continuación (configuración 3), se hará que el operario sobrante de la puerta de entrada/salida manipule la grúa móvil no empleada en la configuración inicial (cuello de botella).

En este subapartado, se han empleado intervalos de confianza “paired-t” al 99,5% (I.C.-p $\alpha=0,005$) para comparar los resultados obtenidos tras simular las configuraciones 2 y 3 con los resultados obtenidos en el subapartado 8.4.1 (configuración 1).

Configuración 2. Reducción de personal en la puerta de entrada/salida

Para ajustar la disponibilidad de los recursos humanos a la demanda y con ello, ahorrar costes, se ha eliminado el trabajador encargado de gestionar la salida de camiones. De tal forma que, en la configuración 2, existe un único trabajador encargado de gestionar la entrada/salida de camiones. Al igual que en la configuración 1, esta persona trabaja de 8:00 a 15:00.

La simulación de la configuración 2 y su comparación con la configuración 1 muestra que:

- La utilización del trabajador que atiende la puerta de entrada/salida aumenta, en media, un 14,40% en la configuración 2 (véase el valor marcado en marrón en la tercera columna de la Tabla 8.10). Este incremento coincide con el porcentaje de utilización del trabajador 2 (trabajador encargado de gestionar la salida de camiones) en la configuración 1 (véase la segunda columna de la Tabla 8.10).
- El porcentaje de camiones que esperan antes de entrar y el tiempo medio de espera antes de entrar aumentan, respectivamente, en un 35,64% y en 0,57min en la configuración 2, ya que, en esta segunda configuración, la puerta no puede gestionar de forma simultánea la entrada/salida de camiones (véanse los valores marcados en naranja claro en la tercera columna de la Tabla 8.10). Del mismo modo, el porcentaje de camiones que esperan antes de salir y el tiempo medio de espera antes de salir aumentan, respectivamente, en un 29,42% y en 0,65min en la configuración 2 (véanse

los valores marcados en naranja oscuro en la tercera columna de la Tabla 8.10).

- La proporción de trenes que salen con retraso de la terminal, el retraso medio en la salida de los trenes, la proporción de camiones que son atendidos en un tiempo máximo de 20min/30min y el tiempo medio de estancia para los camiones a cargar/descargar en la configuración 2 no presentan variaciones significativas respecto a lo observado en la configuración 1, al estar el cero presente en los intervalos de confianza "paired-t" de estas variables de salida (véase la tercera columna de la Tabla 8.10).
- El cero también está presente en los intervalos de confianza utilizados para comparar la utilización de: la grúa móvil, el tractor de maniobras, las vías y la playa de almacenamiento (véase la tercera columna de la Tabla 8.10). Este hecho impide determinar qué configuración proporciona mejores utilidades, al existir ambigüedad en la comparación de estas variables.

Configuración 3. Reducción de personal en la puerta de entrada/salida y ampliación de grúas móviles en uso

En esta alternativa de mejora, se evalúa la asignación del trabajador sobrante de la configuración 2 a la grúa móvil que estaba en desuso en las configuraciones 1 y 2, con el objetivo de reducir parte de los cuellos de botella identificados en la zona de carga/descarga y con ello, mejorar el nivel de servicio de la terminal. De esta forma, en la configuración 3, existen dos grúas móviles operativas de 8:00 a 15:00 y una de 15:00 a 20:00.

La simulación de la configuración 3 y su comparación con la configuración 1 muestra que tras haber ampliado el número de grúas móviles en horario de mañana:

- Todos los trenes salen a tiempo (véanse los valores marcados en azul claro en la cuarta columna de la Tabla 8.10). Además, la proporción de camiones atendidos en un tiempo máximo de 20min aumenta, en media, un 18,29% respecto a lo observado en la configuración 1, mientras que la proporción de camiones atendidos en un tiempo máximo de 30min aumenta un 6,86% (véanse los valores marcados en azul oscuro en la cuarta columna de la Tabla 8.10). De tal forma que, en la configuración 3, el 99,53% de los camiones son atendidos en un tiempo máximo de 20min y el 100% son atendidos en un tiempo máximo de 30min. Los tiempos medios de estancia

de los camiones también mejoran en la configuración 3, disminuyendo, en media, 4,16min para los camiones a cargar y 5,88min para los camiones a descargar (véanse los valores marcados en morado en la cuarta columna de la Tabla 8.10).

- Al igual que en la configuración 2, la utilización del trabajador que atiende la puerta de entrada/salida, el porcentaje de camiones que esperan antes de entrar, el tiempo medio de espera de los camiones antes de entrar, el porcentaje de camiones que esperan antes de salir y el tiempo medio de espera de los camiones antes de salir es mayor en la configuración 3 que en la configuración 1, donde había dos trabajadores en la puerta de entrada/salida (véase los valores marcados en marrón y en naranja en la cuarta columna de la Tabla 8.10).
- La utilización de la grúa móvil 1 es, en media, un 20,38% menor en la configuración 3, ya que, en este caso, recibe ayuda de la grúa móvil 2 para: descargar camiones, cargar camiones, descargar las plataformas de los trenes E-4 y cargar las plataformas de los trenes S-4 (véanse los valores marcados en verde claro en la cuarta columna de la Tabla 8.10).
- Las vías de carga/descarga se utilizan un 2,75% menos en la configuración 3 que en la configuración 1, al tardar menos tiempo en descargar/cargar los trenes E-4 y S-4 (trenes atendidos en horario de mañana). La utilización de las vías de clasificación también es un 0,21% menor en la configuración 3, debido a que las plataformas a descargar de los trenes E-1, E-2 y E-3 pueden acceder antes a la zona de carga/descarga (véanse los valores marcados en verde oscuro en la cuarta columna de la Tabla 8.10).
- La utilización del resto de recursos y de infraestructuras no presenta variaciones significativas respecto a lo indicado en el apartado 8.4.1.

La simulación de la configuración 3 también revela que la operación de la terminal puede mejorar aún más. En esta configuración, se ha incrementado la proporción de contenedores a cargar en camión que precisan de dobles manipulaciones para ser extraídos de la playa de almacenamiento (véase el valor marcado en gris en la cuarta columna de la Tabla 8.10). Esto se debe a que existen ciertos momentos en los que una grúa móvil está colocando/extrayendo un contenedor en/de la playa (véase la grúa móvil 1 en la parte izquierda de la Figura 8.2), cuando, en ese mismo momento, llega la otra grúa móvil para colocar un contenedor que, por sus características de tamaño (20, 30 ó 40 pies), peso

(cargado ó vacío) y cliente final, podría ser apilado sobre alguno de los que están siendo manipulados por la primera grúa. En este caso, para no generar esperas en la atención a los camiones ni en la carga/descarga de los trenes, la segunda grúa móvil descarga el contenedor en un hueco contiguo (véase la grúa móvil 2 en la parte izquierda de la Figura 8.2). Como muestra la parte derecha de la Figura 8.2, tras colocar los contenedores de los trenes E-1, E-2 y E-3 en la playa (contenedores que llegaron a la zona de carga/descarga por la tarde), aumenta el riesgo de realizar dobles manipulaciones para extraer los contenedores del tren E-4 (contenedores que llegaron a la zona de carga/descarga por la mañana). Como se expuso en el subapartado 5.4.3, para reducir el número de contenedores que pueden llegar a moverse al aplicar una estrategia de almacenamiento en altura, podría probarse a almacenar preferentemente en superficie, apilando en altura sólo cuando no quede espacio libre a ras de suelo. La configuración 4, que se muestra a continuación, analiza esta alternativa de mejora.

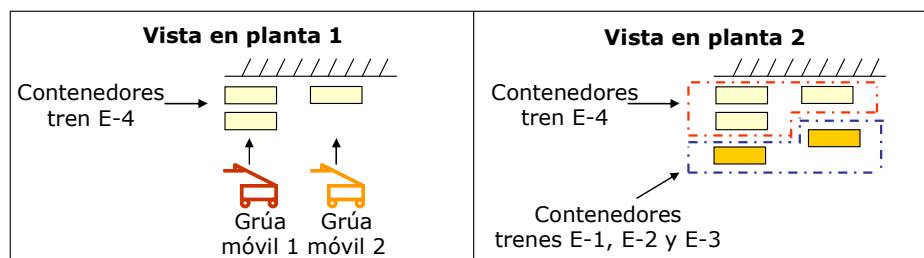


Figura 8.2. Caso 2 – Dobles manipulaciones en la playa de almacenamiento. Fuente: elaboración propia.

Configuración 4. Reducción de personal en la puerta de entrada/salida, ampliación de grúas móviles en uso y almacenamiento en superficie

La simulación de la configuración 4 y su comparación con la configuración 3 muestra que al cambiar la política de almacenamiento:

- La proporción de contenedores que requieren dobles manipulaciones para ser extraídos de la playa de almacenamiento disminuye, en media, un 6,38% respecto a lo observado en la configuración 3 (véanse el valor marcado en gris en la tercera columna de la Tabla 8.11). Al realizar menos dobles manipulaciones, el tiempo medio de estancia para los camiones a cargar y la utilización de la grúa móvil 2 también disminuyen, respectivamente, en 0,34min y en un 0,92% (véanse los valores marcados en morado y en verde en la tercera columna de la Tabla 8.11).
- El resto de variables de salida relativas al nivel de servicio y a la utilización de los recursos y de las infraestructuras de la terminal no presentan variaciones significativas respecto a lo observado en la configuración 3.

	Conf.3 I.C. ($\alpha=0,005$)	Conf.4 - Conf.3 I.C.-p ($\alpha=0,005$)
Proporción trenes salientes con retraso	0,00 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Proporción camiones atendidos como máximo en 20min	99,53 \pm 0,38	0,14 \pm 0,44
Proporción camiones atendidos como máximo en 30min	100,00 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Tiempo medio estancia para camiones a cargar	10,44 \pm 0,09	-0,34 \pm 0,12
Tiempo medio estancia para camiones a descargar	7,74 \pm 0,13	-0,02 \pm 0,24
Proporción camiones que esperan antes de entrar	45,43 \pm 1,44	0,33 \pm 2,33
Tiempo medio de espera antes de entrar	1,77 \pm 0,12	-0,09 \pm 0,22
Proporción camiones que esperan antes de salir	38,70 \pm 1,40	0,56 \pm 1,86
Tiempo medio de espera antes de salir	1,49 \pm 0,11	-0,08 \pm 0,15
Utilización grúa móvil 1	40,26 \pm 0,32	-0,30 \pm 0,44
Utilización grúa móvil 2	42,72 \pm 0,40	-0,92 \pm 0,47
Proporción contenedores a cargar en camión que requieren dobles manipulaciones para ser extraídos de la playa	59,08 \pm 3,76	-6,38 \pm 5,20

Tabla 8.11. Caso 2 – Indicadores de funcionamiento para la configuración 3 y comparación de indicadores para las configuraciones 4-3 (tiempos en minutos, proporciones y utilizaciones en porcentaje). Fuente: elaboración propia.

Al igual que en la configuración 3, la simulación de la configuración 4 revela que el funcionamiento de la terminal puede mejorar aún más. En la configuración 4, siguen existiendo esperas en la entrada/salida de camiones (véanse los valores marcados en naranja en la Tabla 8.11). Para mejorar este aspecto, podría crearse un sistema de citas, de tal forma que los camiones puedan reservar una franja horaria para ser atendidos y los gestores de la terminal puedan consultar la carga de trabajo existente para planificar, por ejemplo, la contratación de una nueva persona que ayude al trabajador de la puerta de entrada/salida durante los momentos pico de trabajo.

8.5. CASO DE ESTUDIO 3

En este apartado, se utiliza la plataforma flexible de simulación para estudiar el nivel de servicio de una nueva terminal, su productividad y el uso de sus recursos e infraestructuras ante dos escenarios de demanda. En el subapartado 8.5.1, se analiza el funcionamiento de la terminal ante un escenario de demanda inicial. En el subapartado 8.5.2, se estudia su funcionamiento ante un nuevo escenario de demanda donde el número de trenes a atender es menor que el inicialmente planteado. En este último subapartado, se evalúan también ciertos cambios en la operación de la terminal, con el objetivo de ajustar la disponibilidad de sus recursos e infraestructuras a la nueva demanda.

La terminal a estudiar se encarga de trasbordar contenedores entre trenes y de cargar/descargar trenes y camiones. Ambas funciones tienen lugar en una zona de carga/descarga con tres playas de carga/descarga.

Dos de estas playas (en adelante, playa C/D1 y playa C/D2) han sido representadas, en el modelo de simulación, por dos módulos de carga/descarga sin grúas pórtico. Cada una de ellas dispone de:

- Una playa de almacenamiento de 9 metros de ancho y 300 metros de largo, donde los contenedores pueden ser apilados hasta tres alturas.
- Una vía de carga/descarga de longitud 380 metros.
- Dos áreas de carga/descarga de camiones con capacidad para ocho camiones (una situada en las proximidades de la playa de almacenamiento y otra al lado de la vía de carga/descarga).

La tercera playa de carga/descarga (en adelante, playa C/D3) ha sido representada, en el modelo de simulación, por un módulo de carga/descarga con grúas pórtico. Esta playa de carga/descarga dispone de:

- Una playa de almacenamiento de 8 metros de ancho y 400 metros de largo, donde los contenedores pueden ser apilados hasta tres alturas.
- Una grúa pórtico.
- Cuatro vías de carga/descarga bajo pórtico de longitud 380 metros.
- Una línea de almacenamiento bajo pórtico de longitud 380 metros, empleada para colocar contenedores que entraron en camión y que van a salir en tren. Los contenedores que entraron en tren serán trasladados desde la zona de las vías de carga/descarga a la playa de almacenamiento, donde esperarán hasta su salida de la terminal.
- Dos áreas de carga/descarga de camiones con capacidad para ocho camiones (una situada en las proximidades de la playa de almacenamiento y otra bajo pórtico).

Además de estas tres playas de carga/descarga, la terminal dispone de:

- Una zona de entrada/salida de camiones, compuesta por:
 - Dos puertas de entrada/salida.
 - Una zona de aparcamiento con capacidad para cuatro camiones.
- Una zona de entrada/salida de trenes, compuesta por:
 - Una vía de entrada y otra de salida.
 - Tres vías de recepción/expedición de longitud 600 metros.

- Tres grúas móviles, que pueden acceder a la playa de almacenamiento, a la vía de carga/descarga y a las dos áreas de carga/descarga de camiones de las playas C/D1 y 2, además de a la playa de almacenamiento, a la línea de almacenamiento y a las dos áreas de carga/descarga de camiones de la playa C/D3.
- Un tractor de maniobras.

8.5.1. SITUACIÓN INICIAL

Escenario de demanda y condiciones adicionales de operación

La Tabla 8.12 muestra el plan de trenes semanal propuesto para las próximas tres semanas. Durante este período, la terminal intercambiará 26 trenes entrantes (E) y 26 trenes salientes (S) a la semana con seis terminales (índices 1 a 6). Todos los trenes tendrán una longitud similar a la de las vías de carga/descarga (380 metros) y transportarán, en media, 18 contenedores. El 50% de los contenedores serán de 40 pies (mientras que el resto serán de 20 pies) y el 50% estarán cargados (mientras que el resto estarán vacíos). El 60% de las plataformas transportadas por los trenes E-1 albergarán contenedores que serán intercambiados con los trenes E-3. El resto de los contenedores transportados por los trenes E-1, E-2, E-3, E-4, E-5 y E-6 saldrán de la terminal en camión.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
1:35	E - 1	E - 1	E - 1	E - 1	E - 1	
2:15	E - 2		E - 2		E - 2	
3:20	E - 3	E - 3	E - 3	E - 3	E - 3	
3:45	E - 4	E - 4	E - 4	E - 4	E - 4	
8:20		S - 6		S - 6		S - 6
8:30	E - 5	E - 5	E - 5	E - 5	E - 5	
19:25	S - 5	S - 5	S - 5	S - 5	S - 5	
20:10	E - 6		E - 6		E - 6	
22:14	S - 3	S - 3	S - 3	S - 3	S - 3	
22:40	S - 4	S - 4	S - 4	S - 4	S - 4	
23:30	S - 2		S - 2		S - 2	
23:48	S - 1	S - 1	S - 1	S - 1	S - 1	

Tabla 8.12. Caso 3 – Plan de trenes inicial. Fuente: elaboración propia.

Cada puerta de entrada/salida de camiones será atendida por un trabajador de lunes a viernes de 8:00 a 20:00. Como en apartados anteriores, la tasa de llegadas de los camiones variará de forma aleatoria y estará condicionada por el horario de trabajo de las puertas y por el horario de llegada/salida de los trenes:

- Los camiones a cargar relacionados con los trenes E-1, E-2, E-3, E-4 y E-5 comenzarán a llegar el mismo día en el que estos trenes entran en la terminal, mientras que los camiones a cargar relacionados con los trenes E-6 comenzarán a llegar un día después de la entrada de estos trenes en la

terminal. No será frecuente encontrar contenedores que esperen más de tres días laborables antes de salir en camión.

- Los camiones a descargar relacionados con los trenes E-1, E-2, E-3, E-4 y E-5 comenzarán a llegar con un día laborable de antelación respecto a su salida en tren, mientras que los camiones a descargar relacionados con los trenes S-6 comenzarán a llegar con dos días laborables de antelación respecto a su salida en tren. Los contenedores que lleguen con menos de una hora y media de antelación respecto a la salida del tren con el que están relacionados no serán cargados.

La Tabla 8.13 muestra los trenes que serán atendidos en cada playa de carga/descarga. Los trenes marcados en verde serán atendidos en la playa C/D1, los trenes marcados en rojo serán atendidos en la playa C/D2 y los trenes marcados en naranja serán atendidos en la playa C/D3.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
1:35	E - 1	E - 1	E - 1	E - 1	E - 1	
2:15	E - 2	E - 2	E - 2	E - 2	E - 2	
3:20	E - 3	E - 3	E - 3	E - 3	E - 3	
3:45	E - 4	E - 4	E - 4	E - 4	E - 4	
8:20		S - 6		S - 6		S - 6
8:30	E - 5	E - 5	E - 5	E - 5	E - 5	
19:25	S - 5	S - 5	S - 5	S - 5	S - 5	
20:10	E - 6		E - 6		E - 6	
22:14	S - 3	S - 3	S - 3	S - 3	S - 3	
22:40	S - 4	S - 4	S - 4	S - 4	S - 4	
23:30	S - 2		S - 2		S - 2	
23:48	S - 1	S - 1	S - 1	S - 1	S - 1	

Tabla 8.13. Caso 3 – Asignación inicial de trenes a playas de carga/descarga. Fuente: elaboración propia.

Para satisfacer este plan de trenes, la terminal utilizará:

- Una grúa móvil (en adelante, grúa móvil 1) de lunes a viernes de 6:00 a 23:00, para atender la carga/descarga de camiones y de trenes en las playas C/D1 y 2.
- Otra grúa móvil (en adelante, grúa móvil 2) de lunes a viernes de 8:00 a 20:30, para atender la carga/descarga de camiones en la playa C/D3 y para mover contenedores entre la zona de las vías de carga/descarga y la playa de almacenamiento de la playa C/D3.
- La última grúa móvil (en adelante, grúa móvil 3) de lunes a viernes de 8:00 a 12:00, para dar apoyo a la grúa móvil 2 en una franja horaria donde el número de contenedores a mover desde la zona de las vías de carga/descarga a la playa de almacenamiento de la playa C/D3 es elevado.

- La grúa pórtico de lunes a viernes de 8:00 a 20:30, para cargar/descargar camiones y trenes en la playa C/D3, así como para trasbordar contenedores entre trenes y para gestionar la línea de almacenamiento de esta playa.
- El tractor de maniobras de lunes a viernes las 24 horas del día y el sábado hasta las 9:00 para gestionar el movimiento de plataformas entre las vías de recepción/expedición y las vías de carga/descarga.

A diferencia de lo expuesto en apartados anteriores, en este caso de estudio, se han empleado ventanas temporales para la carga de los trenes, de tal forma que el trabajo de las grúas pueda especializarse según franjas horarias. En este caso, las grúas estarán dedicadas a la descarga de trenes y a la atención de camiones durante una parte del día, y a la carga de trenes y a la atención de camiones durante otro período. De esta forma, los trenes E-1, E-2, E-3, E-4 y E-5 (atendidos en las playas C/D2 y 3) serán descargados tan pronto como lleguen a la terminal. Su carga, para formar los trenes S-1, S-2, S-3, S-4 y S-5, no comenzará hasta las 13:00 del día en el que tuvo lugar su llegada. Los trenes E-6 (atendidos en la playa C/D1) también serán descargados tan pronto como lleguen a la terminal. Sin embargo, su carga, para formar los trenes S-6, no comenzará hasta la mañana posterior a su llegada.

Resultados

Se ha simulado el funcionamiento de la terminal durante tres semanas, considerando los dos primeros días como tiempo de calentamiento. Al igual que en apartados anteriores, se han realizado diez repeticiones antes de estimar el valor de las variables de salida a estudiar.

Una vez transcurrido el tiempo de calentamiento, la terminal atiende, en media, 898,00 camiones a cargar, 927,00 camiones a descargar, 68,00 trenes entrantes y 68,00 trenes salientes.

La segunda columna de la Tabla 8.14 recoge el resto de indicadores utilizados para analizar el funcionamiento de esta primera configuración. Como en apartados anteriores, cada variable de salida aparece representada por la media de los valores observados en las diez repeticiones realizadas y por el ancho de su intervalo de confianza al 99,5% ($\alpha = 0,005$).

	Conf.1 I.C. ($\alpha = 0,005$)	Conf.2 - Conf.1 I.C.-p ($\alpha=0,005$)
Retraso medio para trenes salientes	0,00 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Proporción camiones atendidos como máximo en 20min	98,82 \pm 0,30	0,92 \pm 0,24
Tiempo medio estancia para camiones a cargar	12,41 \pm 0,05	-0,97 \pm 0,07
Tiempo medio estancia para camiones a descargar	11,31 \pm 0,06	-1,11 \pm 0,08
Utilización puerta entrada/salida 1	40,91 \pm 0,24	-8,84 \pm 0,31
Utilización puerta entrada/salida 2	37,21 \pm 0,23	-10,98 \pm 0,31
Utilización vía entrada	1,24 \pm 0,03	-0,23 \pm 0,02
Utilización vía salida	1,25 \pm 0,02	-0,24 \pm 0,01
Utilización vías expedición/recepción	6,65 \pm 0,02	-1,34 \pm 0,01
Playa C/D1 - Utilización vías carga/descarga	7,39 \pm 0,03	0,00 \pm 0,01
Playa C/D1 - Utilización playa almacenamiento	15,19 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Playa C/D2 - Utilización vías carga/descarga	19,92 \pm 0,04	0,02 \pm 0,07
Playa C/D2 - Utilización playa almacenamiento	13,67 \pm 0,01	0,00 \pm 0,01
Playa C/D3 - Utilización vías carga/descarga	47,73 \pm 0,01	-12,27 \pm 0,01
Playa C/D3 - Utilización playa almacenamiento	17,37 \pm 0,28	-7,39 \pm 0,36
Playa C/D3 - Utilización línea almacenamiento	34,17 \pm 0,02	-11,67 \pm 0,01
Playa C/D3 - Utilización grúa pórtico	34,09 \pm 0,04	-13,20 \pm 0,15
Utilización grúa móvil 1 (de 6:00 a 23:00 en playas C/D1 y 2)	48,13 \pm 0,11	0,12 \pm 0,17
Utilización grúa móvil 2 (de 8:00 a 20:30 en playa C/D3)	45,00 \pm 0,35	-21,57 \pm 0,32
Utilización grúa móvil 3 (de 8:00 a 12:00 en playa C/D3)	40,32 \pm 0,93	-15,02 \pm 0,92
Utilización tractor maniobras	9,17 \pm 0,01	-1,75 \pm 0,02
Proporción camiones que esperan antes de entrar	47,65 \pm 0,57	-17,64 \pm 1,01
Tiempo medio de espera antes de entrar	3,14 \pm 0,03	-1,48 \pm 0,06
Proporción camiones que esperan antes de salir	45,44 \pm 0,80	-20,58 \pm 1,23
Tiempo medio de espera antes de salir	2,04 \pm 0,08	-0,69 \pm 0,15

Tabla 8.14. Caso 3 – Indicadores de funcionamiento para la configuración 1 y comparación de indicadores para las configuraciones 2-1 (tiempos en minutos, proporciones y utilizaciones en porcentaje). Fuente: elaboración propia.

Los resultados de la simulación muestran que:

- La terminal es capaz de satisfacer el plan de trenes sin generar retrasos en su salida, además de ser capaz de atender al 98,82% de los camiones en un tiempo máximo de 20min (véanse las dos primeras filas de la segunda columna de la Tabla 8.14).
- Este buen nivel de servicio se debe a la disponibilidad de recursos y de infraestructuras en valores medios (véase, por ejemplo, la utilización de las infraestructuras de las playas C/D1, 2 y 3 en la segunda columna de la Tabla 8.14).
- A pesar de esta disponibilidad en valores medios, existen momentos puntuales donde aparecen picos de trabajo. Al igual que en los casos de estudio anteriores, estos picos de trabajo afectan a la entrada/salida de camiones y al trabajo de las grúas. Según muestra la segunda columna de la Tabla 8.14, en media, el 47,65% de los camiones atendidos esperan un tiempo medio de 3,14min antes de entrar en la terminal, mientras que el 45,44% de los camiones esperan un tiempo medio de 2,04min antes de salir. Del mismo modo, las grúas presentan picos de trabajo que incrementan el tiempo de estancia de los camiones en la terminal. Estos picos de trabajo son más frecuentes por la tarde que por la mañana,

además de ser más habituales en la playa C/D3 que en el resto de playas de carga/descarga.

Aunque el funcionamiento de la terminal es adecuado en términos de nivel de servicio, parte de los cuellos de botella identificados anteriormente podrían ser mitigados, si se considerara oportuno, aumentando, durante los períodos pico de trabajo, el número personas que atienden las puertas de entrada/salida de camiones y el número de grúas en uso.

8.5.2. SITUACIÓN CON MENOR DEMANDA

Plan de trenes con menor demanda

En este subapartado, se supone que se suprime el servicio de los trenes E-4 y S-4 (atendidos en la playa C/D3).

La Tabla 8.15 muestra los 21 trenes que entrarían (E) y los 21 trenes que saldrían (S) semanalmente tras registrar este cambio.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado
1:35	E - 1	E - 1	E - 1	E - 1	E - 1	
2:15	E - 2		E - 2		E - 2	
3:20	E - 3	E - 3	E - 3	E - 3	E - 3	
8:20		S - 5		S - 5		S - 5
8:30	E - 6	E - 6	E - 6	E - 6	E - 6	
19:25	S - 6	S - 6	S - 6	S - 6	S - 6	
20:10	E - 5		E - 5		E - 5	
22:14	S - 3	S - 3	S - 3	S - 3	S - 3	
23:30	S - 2		S - 2		S - 2	
23:48	S - 1	S - 1	S - 1	S - 1	S - 1	

Tabla 8.15. Caso 3 – Plan de trenes con menor demanda. Fuente: elaboración propia.

Resultados de la nueva configuración y evaluación de cambios en la operación de la terminal

En primer lugar, se ha simulado el nuevo plan de trenes usando las mismas condiciones de operación, el mismo tiempo de simulación, el mismo tiempo de calentamiento y el mismo número de repeticiones que en el subapartado 8.5.1.

Los intervalos de confianza “paired-t” al 99,5% (I.C.-p $\alpha=0,005$) empleados para comparar los resultados de esta nueva configuración (configuraciones 2) con los resultados obtenidos en el subapartado 8.5.1 (configuración 1) aparecen recogidos en la tercera columna de la Tabla 8.14.

En vista de estos resultados, se puede decir que:

- La terminal es capaz de atender el plan de trenes recogido en la Tabla 8.15 con niveles de servicio aceptables. En la configuración 2, no existen retrasos

en la salida de los trenes y la proporción de camiones atendidos en un tiempo máximo de 20min sigue siendo superior al 95%.

- Al disminuir la carga de trabajo de la terminal en la configuración 2, se ha reducido también la utilización de los recursos y de las infraestructuras relacionadas con la entrada/salida de camiones y de trenes (véanse los valores marcados en verde en la tercera columna de la Tabla 8.14) y con ello, parte de los picos de trabajo a los que estaban sometidas las puertas de entrada/salida de camiones en la configuración 1. En la configuración 2, el porcentaje de camiones que esperan antes de entrar y el tiempo medio de espera antes de entrar ha disminuido, respectivamente, en un 17,64% y en 1,48min; mientras que el porcentaje de camiones que esperan antes de salir y el tiempo medio de espera antes de salir se ha reducido en un 20,58% y en 0,69min (véanse los valores marcados en rojo en la tercera columna de la Tabla 8.14).
- Al disminuir la carga de trabajo de la playa C/D3 en la configuración 2, se ha reducido también la utilización de los recursos y de las infraestructuras de esta playa (véanse los valores marcados en naranja en la tercera columna de la Tabla 8.14) y con ello, parte de los picos de trabajo a los que estaban sometidas sus grúas en la configuración 1.
- La eliminación parcial de los cuellos de botella relativos a la puerta de entrada/salida y a las grúas de la playa C/D3 ha permitido que, en la configuración 2, aumente en un 0,92% la proporción de camiones atendidos en un tiempo máximo de 20min y que el tiempo de estancia para los camiones se reduzca, en media, en 0,97min para los camiones a cargar y en 1,11min para los camiones a descargar (véanse los valores marcados en azul claro y en azul oscuro en la tercera columna de la Tabla 8.14).
- El resto de variables de salida recogidas en la Tabla 8.14 no presentan variaciones significativas entre las configuraciones 1 y 2 (véase que el cero está presente en todos los intervalos de confianza marcados en negro en la tercera columna de la Tabla 8.14).

La simulación de la configuración 2 y su comparación con la configuración 1 muestra que la terminal sigue siendo capaz de satisfacer el nuevo plan de trenes con niveles de servicio aceptables. Sin embargo, al haberse disminuido la utilización de las grúas 2 y 3 en esta segunda configuración, se podría probar a ajustar su número a la nueva demanda, con el objetivo de reducir costes.

Por ejemplo, podría probarse a descargar/cargar los trenes E-5 y S-5 (que se atienden en la playa C/D2) en la vía que ha quedado libre en la playa C/D3. Este cambio haría que la utilización de las grúas que trabajan en la playa C/D3 fuera similar a la observada en el subapartado 8.5.1, reduciendo por contra la utilización de la grúa móvil 1, que ahora sólo trabajaría en la playa C/D1. De forma adicional, se podría probar a prescindir de la grúa móvil 2, haciendo que la grúa móvil 1 trabajara en la playa C/D3 además de en la playa C/D1. Tras efectuar estos cambios:

- La playa C/D1 atendería a los trenes E-6 y S-6, mientras que la playa C/D3 atendería a los trenes E-1, E-2, E-3, E-5, S-1, S-2, S-3 y S-5.
- La grúa móvil 1 trabajaría de lunes a viernes de 6:00 a 23:00 en las playas C/D1 y 3, mientras que la grúa móvil 3 trabajaría de lunes a viernes de 8:00 a 12:00 en la playa C/D3.
- La playa C/D2 y la grúa móvil 2 no se utilizarían.

La simulación de esta nueva configuración (configuración 3) y su comparación con la configuración 2 revela que:

- En la configuración 3, tampoco hay problemas para satisfacer el plan de trenes con niveles de servicio aceptables. Todos los trenes salen sin retraso y más del 95% de los camiones son atendidos en un tiempo máximo de 20min.
- El uso de las infraestructuras de la playa C/D3 se ha visto incrementado en la configuración 3, al haber aumentado la carga de trabajo de esta playa (véanse los valores marcados en naranja en la tercera columna de la Tabla 8.16).
- El uso de la grúa pórtico y de la grúa móvil 3 ha aumentado en la configuración 3, para hacer frente a la nueva carga de trabajo a la que está sometida la playa C/D3 y a los momentos en los que la grúa móvil 1 no puede intervenir en esta playa por estar trabajando en la playa C/D1 (véanse los valores marcados en marrón en la tercera columna de la Tabla 8.16). El uso de la grúa móvil 1 (asignada a las playas C/D1 y 3) también ha aumentado en esta última configuración (véase el valor marcado en verde en la tercera columna de la Tabla 8.16).
- En la configuración 3, vuelven a aparecer picos de trabajo similares a los identificados en el apartado 8.5.1 para las grúas de la playa C/D3. Estos

picos de trabajo hacen que la proporción de camiones atendidos en un tiempo máximo de 20min disminuya, en media, en un 0,55% en la configuración 3 y que el tiempo medio de estancia para los camiones a descargar aumente en 0,67min (véanse los valores marcados en azul en la tercera columna de la Tabla 8.16).

- El resto de variables de salida recogidas en la Tabla 8.16 no presentan variaciones significativas entre las configuraciones 2 y 3 (véase que el cero está presente en todos los intervalos de confianza marcados en negro en la tercera columna de la Tabla 8.16).

	Conf.2 I.C. ($\alpha = 0,005$)	Conf.3 - Conf.2 I.C.-p ($\alpha=0,005$)
Retraso medio para trenes salientes	0,00 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Proporción camiones atendidos como máximo en 20min	99,74 \pm 0,15	-0,55 \pm 0,50
Tiempo medio estancia para camiones a cargar	11,44 \pm 0,05	0,02 \pm 0,15
Tiempo medio estancia para camiones a descargar	10,20 \pm 0,04	0,67 \pm 0,15
Utilización puerta entrada/salida 1	32,07 \pm 0,19	-0,10 \pm 2,06
Utilización puerta entrada/salida 2	26,23 \pm 0,15	-0,01 \pm 2,14
Utilización vía entrada	1,01 \pm 0,01	0,00 \pm 0,01
Utilización vía salida	1,01 \pm 0,01	0,00 \pm 0,01
Utilización vías expedición/recepción	5,31 \pm 0,02	0,00 \pm 0,01
Playa C/D1 - Utilización vías carga/descarga	7,39 \pm 0,03	0,01 \pm 0,02
Playa C/D1 - Utilización playa almacenamiento	15,19 \pm 0,00	0,00 \pm 0,00
Playa C/D2 - Utilización vías carga/descarga	19,94 \pm 0,06	---
Playa C/D2 - Utilización playa almacenamiento	13,67 \pm 0,01	---
Playa C/D3 - Utilización vías carga/descarga	35,46 \pm 0,01	6,58 \pm 0,01
Playa C/D3 - Utilización playa almacenamiento	9,98 \pm 0,22	6,80 \pm 0,45
Playa C/D3 - Utilización línea almacenamiento	22,50 \pm 0,01	11,67 \pm 0,01
Playa C/D3 - Utilización grúa pórtico	20,89 \pm 0,09	13,15 \pm 0,29
Utilización grúa móvil 1 - Conf.2 de 6:00 a 23:00 en playas C/D1 y 2 Conf.3 de 6:00 a 23:00 en playas C/D1 y 3	48,25 \pm 0,08	2,92 \pm 0,28
Utilización grúa móvil 2 - Conf.2 de 8:00 a 20:30 en playa C/D3 Conf.3 no se utiliza	23,43 \pm 0,13	---
Utilización grúa móvil 3 - Conf.2 y 3 de 8:00 a 12:00 en playa C/D3	25,30 \pm 0,30	16,27 \pm 0,95
Utilización tractor maniobras	7,42 \pm 0,01	0,00 \pm 0,00
Proporción camiones que esperan antes de entrar	30,01 \pm 0,65	0,35 \pm 1,06
Tiempo medio de espera antes de entrar	1,66 \pm 0,04	0,00 \pm 0,05
Proporción camiones que esperan antes de salir	24,86 \pm 0,76	-1,28 \pm 1,92
Tiempo medio de espera antes de salir	1,35 \pm 0,09	-0,04 \pm 0,10

Tabla 8.16. Caso 3 – Indicadores de funcionamiento para la configuración 2 y comparación de indicadores para las configuraciones 3-2 (tiempos en minutos, proporciones y utilizaciones en porcentaje). Fuente: elaboración propia.

En vista de estos resultados, la aplicación de los cambios introducidos en la configuración 3 (eliminación de la grúa móvil 2, cambio en la asignación de trenes a haces de vías y cambio en la asignación de grúas móviles a playas de carga/descarga) permitiría a la terminal satisfacer el nuevo plan de trenes con unos niveles de servicio aceptables, además de alcanzar un uso de sus recursos más ajustado a la demanda que en la configuración 2.

Capítulo 9

CONCLUSIONES, APORTACIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

9.1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo, se recogen las principales conclusiones (apartado 9.2), aportaciones originales (apartado 9.3) y posibles desarrollos futuros de esta tesis (apartado 9.4).

9.2. CONCLUSIONES

Las conclusiones de este trabajo se han estructurado en siete subapartados. Los subapartados 9.2.1 y 9.2.2 recogen las principales conclusiones identificadas tras estudiar el contexto en el que se enmarcan los objetivos de esta tesis. En los subapartados 9.2.3, 9.2.4, 9.2.5 y 9.2.6, se agrupan las principales conclusiones obtenidas tras abordar cada uno de los cuatro objetivos particulares enunciados en el apartado 1.2. Por último, en el subapartado 9.2.7, se expone una conclusión global relativa al objetivo general expuesto al comienzo del apartado 1.2.

9.2.1. SITUACIÓN DEL TRANSPORTE FERROVIARIO EN EUROPA Y ESPAÑA

- En vista del fuerte crecimiento que ha experimentado el transporte de mercancías por carretera en las últimas décadas, la Comisión Europea y sus países miembros se encuentran ante el reto de fomentar un uso más racional y equilibrado de los modos de transporte con el objetivo de garantizar un sistema de transporte sostenible a largo plazo.
- El transporte intermodal tren-carretera (donde el tren se utiliza para trayectos a medias y largas distancias, combinado con la carretera para realizar la etapa inicial y final del transporte) puede ser una alternativa frente al transporte exclusivo por carretera para ciertos envíos. Sin embargo, las medidas aplicadas, en las últimas décadas, para fomentar la transferencia de carga desde la carretera al ferrocarril no han conseguido incrementar el peso relativo de este último modo, de ahí que siga siendo necesaria la generación de nuevas medidas (directivas, buenas prácticas, etc.) que ayuden a mejorar su atractivo.

9.2.2. SIMULACIÓN COMO TÉCNICA PARA ESTUDIAR TERMINALES FERROVIARIAS DE CONTENEDORES

- Las terminales ferroviarias de contenedores presentan problemas de carácter estratégico, táctico y operacional que pueden ser abordados usando modelos analíticos y modelos de simulación.

- Los modelos analíticos suelen utilizarse para estudiar problemas de carácter operacional relativos a una zona específica de una terminal (zona dedicada a la carga/descarga de trenes, zona dedicada al almacenamiento de contenedores, etc.). Los modelos analíticos empleados para estudiar terminales en su conjunto suelen ser menos frecuentes y, en caso de ser planteados, suelen asumir fuertes simplificaciones que pueden influir en la precisión de sus resultados.
- La simulación ha sido empleada para estudiar terminales complejas, donde pueden aparecer sucesos estocásticos, con suficiente nivel de detalle como para proporcionar información sobre problemas operacionales, tácticos y estratégicos relativos a su diseño y operación.

9.2.3. MODELOS DE SIMULACIÓN PARA APOYAR DECISIONES ESTRATÉGICAS Y TÁCTICAS RELATIVAS A TERMINALES

- La mayor parte de los trabajos de simulación publicados sobre terminales de contenedores hacen referencia a terminales portuarias, no a terminales ferroviarias ni fluviales.
- Las conclusiones que se derivan de la investigación del subsistema marítimo de una terminal portuaria o del subsistema fluvial de una terminal fluvial no suelen ser directamente aplicables al subsistema ferroviario, ya que los subsistemas marítimo y fluvial son cercanos entre sí, pero muy diferentes del ferroviario en términos de recursos, infraestructuras y operaciones.
- Los trabajos de simulación empleados para apoyar decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y al rediseño de terminales de contenedores pueden clasificarse en dos categorías: modelos de simulación no flexibles y plataformas flexibles de simulación, según su capacidad para representar varios sistemas de forma rápida y sencilla.
- La mayor parte de los trabajos encontrados en la literatura hacen referencia a modelos de simulación no flexibles.
- El número de configuraciones que pueden ser simuladas con las tres plataformas flexibles de simulación empleadas, en la literatura, para apoyar la toma de decisiones estratégicas y tácticas relativas al diseño y al rediseño de terminales ferroviarias de contenedores viene limitado por el nivel de detalle con el que han sido modelados parte de los procesos simulados y por la existencia de ciertos aspectos, relativos al diseño y a la operación de una

terminal, que no pueden ser parametrizados (éste es el caso, por ejemplo, de: las funciones que realiza la terminal a simular, el tipo de recursos y de infraestructuras de que dispone y las reglas de operación que emplea).

- Las tres plataformas flexibles encontradas para estudiar decisiones similares relativas a terminales portuarias encargadas de intercambiar contenedores entre barcos y camiones parecen ser menos flexibles aun en diseño y en operación que las indicadas anteriormente para simular terminales ferroviarias.

9.2.4. SIMILITUDES Y DIFERENCIAS ENTRE TERMINALES FERROVIARIAS DE CONTENEDORES

- Las tres fuentes de información utilizadas, en esta tesis, para recabar información sobre las distintas terminales ferroviarias de contenedores que existen en el mundo han proporcionado resultados complementarios:
 - La revisión bibliográfica ha proporcionado una visión general sobre el sistema de estudio y una primera definición de sus principales infraestructuras, recursos, procesos y layout.
 - Las entrevistas con expertos españoles y las visitas a terminales reales han sido de gran utilidad para analizar las reglas de operación aplicadas en las terminales, dado que la información proporcionada por la revisión bibliográfica en relación a este aspecto era escasa.
 - El estudio de fuentes “on-line” y la entrevista con un experto internacional no han sido de gran utilidad para el estudio de las reglas de operación. Sin embargo, han sido de gran interés para expandir y corregir parte de las conclusiones obtenidas a partir de las otras dos fuentes de información.
- El estudio de terminales ha permitido identificar que gran parte de las terminales ferroviarias integradas en puertos están lo suficientemente alejadas de los muelles como para no permitir el intercambio directo de contenedores entre trenes y barcos. Este tipo de terminales emplean recursos, infraestructuras y procesos similares a los presentes en las terminales ferroviarias interiores.
- El contenedor es la unidad de carga más utilizada en las terminales ferroviarias estudiadas y el intercambio de contenedores entre modos es la función más extendida. Los recursos, las infraestructuras y las operaciones

empleadas para satisfacer esta función vienen condicionadas, entre otros aspectos, por el sistema utilizado para transportar contenedores sobre trenes.

- La mayor parte de las terminales estudiadas cargan contenedores directamente sobre las plataformas de los trenes. En estas terminales, los contenedores pueden almacenarse de dos formas alternativas. En la primera alternativa, utilizada frecuentemente en Norte América, cada contenedor es colocado sobre una plataforma porta contenedores, donde espera hasta su salida de la terminal. En la segunda, utilizada con mayor frecuencia en Europa, Australia y Asia, los contenedores son almacenados en el suelo de la terminal. En ambos casos, los equipos empleados con mayor frecuencia para manipular contenedores son grúas pórtico, grúas móviles, carretillas pórtico, cargadores y/o tractores. Las grúas pórtico se suelen ocupar de cargar/descargar trenes y camiones, mientras que el resto de equipos se encargan de darles apoyo. Las terminales que almacenan contenedores sobre plataformas porta contenedores usan grúas móviles, carretillas pórtico y/o cargadores para cargar/descargar camiones y tractores para mover las plataformas porta contenedores por la terminal. Las terminales que almacenan contenedores en el suelo suelen utilizar grúas móviles, carretillas pórtico y/o cargadores para cargar/descargar camiones y para colocar/extraer contenedores de las zonas de almacenamiento. A diferencia de las grúas móviles y pórtico, las carretillas pórtico y los cargadores sólo pueden apilar contenedores en una fila. Esto implica diseñar zonas de almacenamiento menos eficientes en términos de espacio, al tener que crear pasillos entre filas de contenedores para que estos equipos puedan moverse.
- El estudio de terminales ha permitido identificar, además, otros tres sistemas para transportar contenedores sobre trenes, basados en el uso de: semirremolques, plataformas bimodales y camiones completos.
- El uso de semirremolques está más extendido en Norte América que en Europa. Los recursos y las infraestructuras empleados para cargar semirremolques sobre trenes son similares a los utilizados por las terminales norteamericanas que almacenan contenedores sobre plataformas porta contenedores.
- El uso de plataformas bimodales y de camiones completos está menos extendido que los dos sistemas anteriores. La revisión bibliográfica ha permitido identificar terminales que trabajan con plataformas bimodales sólo

en Australia y en Estados Unidos, mientras que el estudio de fuentes “on-line” ha revelado la existencia de terminales que cargan camiones completos sobre trenes sólo en Alemania, Austria y Suiza.

- Además de intercambiar contenedores entre modos, gran parte de las terminales ferroviarias estudiadas pueden ser capaces de trasbordar contenedores entre trenes y/o de formar nuevos trenes salientes a partir de la clasificación de las plataformas transportadas por otros trenes entrantes.
- Los recursos y las infraestructuras empleados para cargar/descargar trenes/camiones y para trasbordar contenedores entre trenes son similares, pero diferentes de los empleados para clasificar plataformas.
- La revisión bibliográfica ha permitido identificar tres tipos de vías para clasificar plataformas, siendo las construidas sobre un terreno llano las más comunes en Estados Unidos y en Europa.
- Las terminales ferroviarias estudiadas trabajan contra un plan de trenes y el cumplimiento de este plan es uno de los principales indicadores para determinar si una terminal está funcionando correctamente.

9.2.5. DISEÑO Y DESARROLLO DE LA PLATAFORMA FLEXIBLE

- En el desarrollo de la plataforma flexible de simulación presentada en esta tesis, la construcción del modelo conceptual del sistema a simular ha sido una tarea compleja, debido al gran número de sistemas que pretende abarcar esta herramienta. Para tratar este problema, han sido de gran utilidad las conclusiones del estudio de terminales mencionado en el apartado anterior.
- La plataforma flexible de simulación presentada en esta tesis es capaz de modelar las funciones, los recursos, las infraestructuras, el layout, los turnos de trabajo y la demanda de gran parte de las terminales ferroviarias de contenedores europeas y australianas y de una parte de las terminales norteamericanas analizadas a lo largo del estudio de terminales. Sin embargo, la generalización de sus reglas de operación es más compleja, al haber usado, principalmente, las visitas a terminales españolas y las entrevistas con sus gestores como fuente para recabar esta información.
- Los prototipos creados, como paso previo al desarrollo de la plataforma flexible de simulación de esta tesis, han sido de gran utilidad para:

- Comprobar que los softwares elegidos para implementar el modelo de simulación, la interfaz de configuración y los ficheros de resultados eran adecuados.
- Determinar que podían crearse plataformas flexibles capaces de configurar características que aparecían fijas en otras herramientas de simulación encontradas en la literatura (por ejemplo, funciones, tipo de recursos, etc.).
- Verificar que podían crearse plataformas flexibles capaces de apoyar el estudio de terminales y de decisiones no analizadas previamente en la literatura revisada.
- La creación de un conjunto de módulos, capaces de representar las principales zonas que variaban de unas terminales a otras, facilitó la programación del modelo de simulación, además de:
 - Facilitar su verificación.
 - Hacer casi inmediata la ampliación del número de módulos que lo componen, para representar nuevas terminales no consideradas en el alcance de esta tesis.
 - Favorecer la modificación de los módulos existentes y/o la incorporación de nuevos módulos, para representar aspectos no considerados en el alcance de esta tesis.
- La creación de módulos combinada con el uso de una interfaz de usuario para particularizar las características de las terminales a simular ha permitido desvincular la configuración del modelo de simulación de su programación, de tal forma que usuarios sin conocimientos de programación en Witness puedan modelar un conjunto de escenarios más amplio que los registrados en otras herramientas de simulación estudiadas.
- La implementación de la interfaz de usuario fue algo más compleja de lo que se había pensado en un principio, al haber tenido que crear macros para generar los ficheros que se emplean para configurar las características de ciertos elementos del modelo de simulación. A su vez, esto hizo que la verificación de la plataforma flexible fuera también más laboriosa de lo que se había pensado inicialmente, ya que además de verificar el código relativo al modelo de simulación y a las conexiones que existen entre él y la interfaz

de usuario, fue necesario verificar el código implementado para crear estos ficheros.

- El contacto con expertos españoles en transporte ferroviario de contenedores ha sido esencial para validar la plataforma flexible. Sin embargo, podría hacerse una validación más completa y precisa de esta herramienta si existiera la posibilidad de visitar nuevos sistemas reales, que permitieran recabar información con la que contrastar las hipótesis asumidas al construir el modelo conceptual de la plataforma flexible, así como los valores de sus variables de salida.

9.2.6. ESTUDIO DE ESCENARIOS CON LA PLATAFORMA FLEXIBLE

- Los casos de estudio analizados en el capítulo 8 han permitido comprobar que la plataforma flexible presentada en esta tesis constituye un entorno muy útil para:
 - Modelar diversas terminales ferroviarias de contenedores de una forma fiel a la realidad, rápida y sencilla.
 - Prever la productividad de las terminales estudiadas, su nivel de servicio y el uso de sus recursos e infraestructuras dado un plan de trenes.
- Los casos de estudio también han puesto de manifiesto la utilidad de los resultados proporcionados por la plataforma flexible para identificar configuraciones de mejora sobre las terminales ficticias planteadas inicialmente. Además de haber permitido comprobar la utilidad de la plataforma flexible para evaluar estas nuevas configuraciones, con el objetivo de identificar el grado de mejora que proporcionan.
- Las configuraciones analizadas en el capítulo 8 han permitido comprobar que el funcionamiento de las terminales simuladas no sólo viene condicionado por sus características internas sino por dos factores externos relativos a:
 - Los horarios de llegada/salida de los trenes. En aquellas redes ferroviarias donde la circulación de los trenes de mercancías se realiza con mayor frecuencia durante la noche para evitar interferencias con los trenes de pasajeros es difícil equilibrar la carga de trabajo de las terminales, al existir, como se ha visto en el capítulo 8, un gran número de trenes entrantes a primera hora del día y un gran número de trenes salientes a última hora de la tarde o durante la noche.

- Las preferencias de los clientes finales para llevar/recoger contenedores a/de la terminal. En los casos de estudio del capítulo 8, se han encontrado pico puntuales en la llegada de camiones, que han provocado que ciertos recursos y/o infraestructuras de las terminales se convirtieran en cuellos de botella (éste es el caso, por ejemplo, de las grúas o de las puertas de entrada/salida de camiones). Del mismo modo, se han identificado clientes que llevan contenedores con poca antelación respecto a su salida en tren o que los retiran poco después de su llegada en tren; mientras que otros clientes utilizan las terminales como lugar más o menos prolongado de almacenamiento, lo que suele incrementar el porcentaje de utilización de las zonas de almacenamiento y la necesidad de realizar dobles manipulaciones para extraer los contenedores requeridos.

9.2.7. CONCLUSIÓN GLOBAL

- Esta tesis presenta un enfoque modular y flexible diferente a los encontrados en la literatura revisada. Este enfoque ha proporcionado resultados satisfactorios para resolver el problema de estudio planteado, además de ser el punto de partida para definir las aportaciones y los desarrollos futuros que se presentan en los apartados 9.3 y 9.4.

9.3. APORTACIONES

En relación a las conclusiones anteriormente presentadas, las principales aportaciones originales de esta tesis son las siguientes:

- El desarrollo de un estudio (basado en la revisión de múltiples artículos y fuentes “on-line”, así como en el estudio de tres terminales reales y en las entrevistas con diversos expertos en transporte ferroviario de contenedores) que proporciona más detalles que los encontrados en la literatura sobre las similitudes y las diferencias presentes en las terminales ferroviarias de contenedores que operan en el mundo.
- La creación de una plataforma flexible cuyo ámbito de estudio es más amplio que el elegido por otras herramientas de simulación estudiadas en la literatura. El ámbito de estudio de la plataforma flexible no queda limitado al estudio de una única terminal ni al estudio de las terminales que operan en un país concreto, sino que se extiende sobre gran parte de las terminales

ferroviarias de contenedores presentes en Europa y en Australia y sobre una parte de las terminales que operan en Norte América.

- La construcción de una plataforma flexible de simulación capaz de representar los procesos de diversas terminales ferroviarias de contenedores con mayor nivel de detalle que otras herramientas de simulación encontradas en la literatura (por ejemplo, en la plataforma flexible desarrollada se han considerado las inspecciones que se realizan sobre los trenes después de su entrada y antes de su salida de la terminal), de tal forma que los resultados proporcionados por esta plataforma flexible puedan ser más precisos.
- El desarrollo de una plataforma flexible de simulación capaz de configurar ciertos aspectos clave para el diseño y para la operación de una terminal ferroviaria de contenedores que permanecen fijos en otras plataformas flexibles encontradas en la literatura. Entre estos nuevos aspectos, se pueden destacar: las funciones que realiza la terminal a simular, el tipo de recursos y de infraestructuras de que dispone y las reglas de operación que emplea.
- Por combinación de las tres aportaciones anteriores, la generación de una plataforma flexible de simulación capaz de proporcionar información sobre terminales ferroviarias de contenedores y sobre decisiones estratégicas y tácticas relativas a su diseño y operación no estudiadas previamente en la literatura revisada.
- El desarrollo de un conjunto de módulos creados para facilitar la programación y la verificación del modelo de simulación, además de para simplificar la modificación de los módulos existentes, su ampliación en número y la incorporación de nuevos módulos que representen aspectos no considerados en el alcance de esta tesis.
- El desarrollo de una interfaz de usuario provista de múltiples utilidades (explicación de los datos requeridos, mensajes de error que aparecen cuando los valores introducidos son incorrectos, etc.) para evitar errores durante la recogida de información sobre el sistema a simular.
- Por combinación de las dos aportaciones anteriores, la aplicación de un enfoque modular y flexible que desvincula la configuración del modelo de simulación de su programación, de tal forma que usuarios sin conocimientos

de programación en Witness puedan modelar y estudiar diversas terminales ferroviarias de contenedores.

9.4. DESARROLLOS FUTUROS

A partir del trabajo realizado en esta tesis, se sugieren los siguientes desarrollos futuros:

- Encontrar información precisa sobre el diseño y la operación de nuevas terminales nacionales e internacionales que pueda ser utilizada para corroborar, de una forma más exacta, la capacidad de la plataforma flexible desarrollada para representar diversos sistemas reales, así como para aumentar la confianza en la utilidad de sus resultados.
- Desarrollar una interfaz de resultados que facilite el cálculo de medias, desviaciones típicas e intervalos de confianza para las variables de salida que se desprenden de la plataforma flexible en aquellos escenarios donde se hayan utilizado distribuciones de probabilidad para alimentar el modelo de simulación.
- Identificar si existen terminales ferroviarias de contenedores que utilicen sistemas de información, similares a los utilizados en ciertas terminales portuarias estudiadas en la literatura, para gestionar sus operaciones. Por ejemplo, sistemas de información encargados de asignar trabajo a las grúas o de determinar el mejor emplazamiento para un contenedor dentro de una zona de almacenamiento. En caso de existir, intentar preparar la plataforma flexible de esta tesis para que pueda recibir, como parámetros de entrada, las instrucciones de operación proporcionadas por estos sistemas.
- Crear nuevos módulos y/o modificar los módulos existentes que componen el modelo de simulación para que la plataforma flexible pueda representar otras terminales ferroviarias que han quedado fuera del alcance de esta tesis. Éste puede ser el caso, por ejemplo, de terminales que manipulan semirremolques además de contenedores o de terminales cuyas vías de clasificación han sido construidas en pendiente.
- Del mismo modo, extender el enfoque modular y flexible empleado a lo largo del diseño y del desarrollo de la plataforma flexible de esta tesis para estudiar nuevas terminales donde puedan existir nuevos modos de transporte. Éste puede ser el caso, por ejemplo, de puertos marítimos o de puertos fluviales.

- Utilizar la plataforma flexible desarrollada como punto de partida para modelar redes ferroviarias de transporte intermodal, con el objetivo de estudiar y de mejorar su funcionamiento y con ello, fomentar el atractivo del transporte intermodal.

Capítulo 10

BIBLIOGRAFÍA

- Abacoumkin, C. y Ballis, A. (2004). *Development of an expert system for the evaluation of conventional and innovative technologies in the intermodal transport area*. European Journal of Operational Research, Vol. 152, No. 2, pp. 410-419.
- Adamko, N. y Marton, P. (2008). *Villon - A tool for simulation of operation of transportation terminals*. Communications, Scientific letters of the University of Zilina, Vol. 2, pp. 10-14. ISSN 1335-4205.
- ADIF (2008). *La calidad del transporte ferroviario de mercancías. Informe de progreso 2007/2008*. <http://www.docutren.com/archivos/doc_internacionales/docs/docu34.pdf>. En Internet 6/3/2012.
- ADIF (2012a). *Declaración sobre la red 2012*. <http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/declaracion_de_la_red.shtml>. En Internet 6/3/2012.
- ADIF (2012b). *Horarios de servicio en instalaciones principales*. <http://www.adif.es/es_ES/infraestructuras/doc/horarios_instalaciones_2012.pdf>. En Internet 5/6/2012.
- ADIF (2012c). *Infraestructuras y estaciones. Servicios logísticos. Mapa de instalaciones logísticas y técnicas*. <http://www.adif.es/es_ES/infraestructuras/terminales/terminales.shtml>. En Internet 7/6/2012.
- ADIF (2012d). *Presentación AGYL. Aplicación para la Gestión y la Logística*. <http://www.adif.es/es_ES/infraestructuras/terminales/doc/PresentacionAGYL.pdf>. En Internet 5/6/2012.
- AGORA (2012). *AGORA intermodal terminals*. <http://www.intermodal-terminals.eu/content/index_eng.html>. En Internet 2/3/2012.
- Alicke, K. (2002). *Modeling and optimization of the intermodal terminal Mega Hub*. OR Spectrum, Vol. 24, No. 1, pp. 1-18.
- Ambrosino, D., Bramardi, A., Pucciano, M., Sacone, S. y Siri, S. (2011). *Modeling and solving the train load planning problem in seaport container terminals*. Proceedings of the 2011 IEEE Conference on Automation Science and Engineering (CASE 2011). Trieste, Italy. pp. 208-213.

- Ambrosino, D. y Tànfani, E. (2009). *A discrete event simulation model for the analysis of critical factors in the expansion plan of a marine container terminal*. Proceedings of the 23rd European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2009). Madrid, España. pp. 288-294.
- Ambrosino, D. y Tànfani, E. (2012). *An integrated simulation and optimization approach for seaside terminal operations*. Proceedings of the 26th European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2012). Koblenz, Alemania. pp. 602-609.
- Angeloudis, P. y Bell, M.G.H. (2011). *A review of container terminal simulation models*. Maritime Policy & Management, Vol. 38, No. 5, pp. 523-540.
- Bae, H.Y., Choe, R., Park, T. y Ryu, K.R. (2011). *Comparison of operations of AGVs and ALVs in an automated container terminal*. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 22, No. 3, pp. 413-426.
- Ballis, A. y Abacoumkin, C. (1996). *A container terminal simulation model with animation capability*. Journal of Advanced Transportation, Vol. 30, No. 1, pp. 37-57.
- Ballis, A. y Golias, J. (2002). *Comparative evaluation of existing and innovative rail-road freight transport terminals*. Transportation Research, Part A (Policy and Practice), Vol. 36, No. 7, pp. 593-611.
- Ballis, A. y Golias, J. (2004). *Towards the improvement of a combined transport chain performance*. European Journal of Operational Research, Vol. 152, No. 2, pp. 420-436.
- Ballis, A., Golias, J. y Abakoumkin, C. (1997). *A comparison between conventional and advanced handling systems for low volume container maritime terminal*. Maritime Policy & Management, Vol. 24, No. 1, pp. 73-92.
- Banks, J. (1998). *Handbook of simulation: principles, methodology, advances applications and practice*. 1ª edición. John Wiley & Sons, Nueva York (Estados Unidos). ISBN 0471134031.
- Banks, J., Carson II, J.S., Nelson, B.L. y Nicol, D.M. (2001). *Discrete-event system simulation*. 3ª edición. Upper Saddle River, Nueva Jersey (Estados Unidos). ISBN 0-13-088702-1.

- Benna, T. y Gronalt, M. (2008). *Generic simulation for rail-road container terminal*. Proceedings of the 2008 Winter Simulation Conference (WSC 2008). Miami, FL, Estados Unidos. pp. 2656-2660.
- Bielli, M., Boulmakoul, A. y Rida, M. (2006). *Object oriented model for container terminal distributed simulation*. European Journal of Operational Research, Vol. 175, No. 3, pp. 1731-1751.
- Bish, E.K. (2003). *A multiple-crane-constrained scheduling problem in a container terminal*. European Journal of Operational Research, Vol. 144, No. 1, pp. 83-107.
- BOE, 2003. *Ley 39/2003, de 17 de noviembre, del Sector Ferroviario*. <<http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2003-20978>>. En Internet 23/7/2012.
- Bontekoning, Y.M., Macharis, C. y Trip, J.J. (2004). *Is a new applied transportation research field emerging?—A review of intermodal rail-truck freight transport literature*. Transportation Research, Part A (Policy and Practice), Vol. 38, No. 1, pp. 1-34.
- Bostel, N. y Dejax, P. (1998). *Models and algorithms for container allocation problems on trains in a rapid transshipment shunting yard*. Transportation Science, Vol. 32, No. 4, pp. 370-379.
- Boysen, N. y Fliedner, M. (2010). *Determining crane areas in intermodal transshipment yards: the yard partition problem*. European Journal of Operational Research, Vol. 204, No. 2, pp. 336-342.
- Boysen, N., Fliedner, M., Jaehn, F. y Pesch, E. (2011). *A survey on container processing in railway yards: decision problems, optimization procedures and research challenges*. Jena Research Papers in Business and Economics, Working and Discussion Paper Series, School of Economics and Business Administration, Universidad Friedrich Schiller de Jena (Alemania). ISSN 1864-3108.
- Boysen, N., Fliedner, M. y Kellner, M. (2010). *Determining fixed crane areas in rail-rail transshipment yards*. Transportation Research, Part E (Logistics and Transportation Review), Vol. 46, No. 6, pp. 1005-1016.
- Bugaric, U. y Petrovic, D. (2007). *Increasing the capacity of terminal for bulk cargo unloading*. Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 15, No. 10, pp. 1366-1381.

- Bruns, F. y Knust, S. (2012). *Optimized load planning of trains in intermodal transportation*. OR Spectrum, Vol. 34, No. 3, pp. 511-533.
- Camamero Orive, A. y González Cancelas, N. (2005). *Cadenas integradas de transporte*. 1ª edición. Fundación Agustín de Betancourt, Madrid (España). ISBN 84-609-8349-8.
- Caris, A., Macharis, C. y Janssens, G. (2008). *Planning problems in intermodal freight transport: accomplishments and prospects*. Transportation Planning and Technology, Vol. 31, No. 3, pp. 277-302.
- Cartenì, A. y de Luca, S. (2012). *Tactical and strategic planning for a container terminal: modelling issues within a discrete event simulation approach*. Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 25, No. 1, pp. 123-145.
- Cenek, P. (1996). *Simulation of processes in a marshalling yard*. Computers in Railways V: Railways Systems and Management, Vol. 1, pp. 501-510.
- Chang, D., Jiang, Z., Yan, W. y He, J. (2011). *Developing a dynamic rolling-horizon decision strategy for yard crane scheduling*. Advanced Engineering Informatics, Vol. 25, No. 3, pp. 485-494.
- Chesscon (2012). *ISL Applications. Products. Chesscon*. <<http://www.isl-applications.com/chesscon/index.html>>. En Internet 31/7/2012.
- Chung, C.A. (2003). *Simulation modeling handbook: a practical approach*. 1ª edición. CRC Press, Nueva York (Estados Unidos). ISBN 0-8493-1241-8.
- Comisión Europea (1996). *Task force transport intermodality: diagnosis report*. <<http://cordis.europa.eu/transport/src/taskforce/src/tfreports.htm>>. En Internet 1/3/2012.
- Comisión Europea (2001). *White paper. European transport policy for 2010: time to decide*. Oficina de Publicaciones Oficiales de la Unión Europea, Luxemburgo. ISBN 92-894-0337
- Comisión Europea (2002). *Transporte intermodal: programa PACT (1997-2001)*. <http://europa.eu/legislation_summaries/other/l24172_es.htm>. En Internet 2/3/2012.
- Comisión Europea (2007a). *Libro Blanco: una estrategia para la revitalización de los ferrocarriles comunitarios*.

- <http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/l24014_es.htm>. En Internet 2/3/2012.
- Comisión Europea (2007b). *Transporte intermodal: programa MARCO POLO*. <http://europa.eu/legislation_summaries/transport/intermodality_transeuropea_n_networks/l24159_es.htm>. En Internet 2/3/2012.
- Comisión Europea (2010). *Agencia ferroviaria europea*. <http://europa.eu/legislation_summaries/transport/bodies_objectives/l24013_es.htm>. En Internet 2/3/2012.
- Comisión Europea (2011a). *Desarrollo de los ferrocarriles comunitarios*. <http://europa.eu/legislation_summaries/transport/rail_transport/l24057_es.htm>. En Internet 6/3/2012.
- Comisión Europea (2011b). *EU transport in figures. Statistical pocketbook 2011*. Oficina de Publicaciones Oficiales de la Unión Europea, Luxemburgo. ISBN 978-92-79-19508-2.
- Comisión Europea (2011c). *Libro Blanco. Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible*. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:ES:PDF>>. En Internet 2/3/2012.
- Comisión Europea (2011d). *Programa Marco Polo II*. <http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/l24465_es.htm>. En Internet 2/3/2012.
- Comisión Europea (2012). *Transport research knowledge centre. Projects & analysis*. <<http://www.transport-research.info/web/projects/>>. En Internet 2/3/2012.
- Corry, P. y Kozan, E. (2006). *An assignment model for dynamic load planning of intermodal trains*. Computers & Operations Research, Vol. 33, No. 1, pp. 1–17.
- Corry, P. y Kozan, E. (2008). *Optimised loading patterns for intermodal trains*. OR Spectrum, Vol. 30, No. 4, pp. 721–750.
- Cortés, P., Muñuzuri, J., Ibáñez, J.N. y Guadix, J. (2007). *Simulation of freight traffic in the Seville inland port*. Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 15, No. 3, pp. 256-271.

- Crainic, T.G. y Laporte, G. (1997). *Planning models for freight transportation*. European Journal of Operational Research, Vol. 97, No. 3, pp. 409-438.
- Ding, Y. (2010). *Throughput capacity of a container terminal considering the combination patterns of the types of arriving vessels*. Journal of Shanghai Jiaotong University (English Edition), Vol. 15, No. 1, pp. 124-128.
- Dong, Y. (1997). *Modeling rail freight operations under different operating strategies*. Director de tesis: Joseph M. Sussman. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil and Environmental Engineering.
- Eurostat (2011). *Energy, transport and environment indicators. Eurostat pocketbook 2010*. Oficina de Publicaciones Oficiales de la Unión Europea, Luxemburgo. IBSN 978-92-79-16303-6.
- Eurostat (2012). *Statistics/ transport/ database*. <<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/transport/data/database>>. En Internet 1/3/2012.
- Ferreira, L. (1997). *Planning Australian freight rail operations: An overview*. Transportation Research, Part A (Policy and Practice), Vol. 31, No. 4, pp. 335-348.
- Ferreira, L. y Sigut, J. (1993). *Measuring the performance of intermodal freight terminals*. Transportation Planning and Technology, Vol. 17, No. 3, pp. 269-280.
- Ferreira, L. y Sigut, J. (1995). *Modelling intermodal freight terminal operations*. Road and Transport Research Journal, Vol. 4, No. 4, pp. 4-16.
- FlexSim CT (2012). *FlexSim. Software. FlexSim CT. Container Terminal Simulation*. <<http://www.flexsim.com/flexsim-ct/>>. En Internet 31/7/2012.
- Froyland, G., Koch, T., Megow, N., Duane, E. y Wren, H. (2008). *Optimizing the landside operation of a container terminal*. OR Spectrum, Vol. 30, No. 1, pp. 53-75.
- Gambardella, L.M., Mastrolilli, M., Rizzoli, A.E. y Zaffalon, M. (2001). *An optimization methodology for intermodal terminal management*. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 12, No. 5-6, pp. 521-534.
- Gambardella, L.M., Rizzoli, A.E. y Funk, P. (2002). *Agent-based planning and simulation of combined rail/road transport*. Simulation, Vol. 78, No. 5, pp. 293-303.

- Gambardella, L.M., Rizzoli, A.E. y Zaffalon, M. (1998). *Simulation and planning of an intermodal container terminal*. Simulation, Vol. 71, No. 2, pp. 107-116.
- García, A. y García, I. (2009). *A flexible approach for the design of a multimodal terminal simulation model*. Proceedings of the 23rd European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2009). Madrid, España. pp. 281-287.
- García, A. y García, I. (2012). *A simulation-based flexible platform for the design and evaluation of rail service infrastructures*. Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 27, pp. 31-46.
- García, I. y Gutiérrez, G. (2003). *A simulation model for strategic planning in rail freight transport systems*. Institute of Transportation Engineers Journal, Vol. 73, No. 9, pp. 32, 37-40.
- García-Hernández, A. y García-Gutiérrez, I. (2012). *Optimization of combined transportation infrastructures using iterative simulation: railroad terminal study*. DYNA Ingeniería e Industria, Vol. 87, No. 4, pp. 474-480.
- García Gutiérrez, I. (2001). *Diseño y desarrollo de un modelo de apoyo a la generación y evaluación de configuraciones de redes de transporte ferroviario de mercancías*. Directores de tesis: Gil Gutiérrez Casas y Carlos Mataix Aldeanueva. Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica.
- García Sánchez, A. (2007). *Programación del transporte de hidrocarburos por oleoductos mediante la combinación de técnicas metaheurísticas y de simulación*. Director de tesis: Luis Miguel Arreche Bedia. E.T.S.I. Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid, Departamento de Ingeniería de Organización, Administración de Empresas y Estadística.
- García Sánchez, A., García Gutiérrez, I. y Pérez Juan, L. (2006). *Capacity assessment via simulation for a Spanish dry port*. Proceedings of the International Conference on Harbour, Maritime & Multimodal Logistics Modelling and Simulation (HMS 2006). Barcelona, España. pp. 689-695.
- González, J.A., Ponce, E., Mataix, C. y Carrasco, J. (2008). *The automatic generation of transshipment plans for a train-train terminal: application to the Spanish-French border*. Transportation Planning and Technology, Vol. 31, No. 5, pp. 545-567.

- Gronalt, M., Benna, T. y Posset, M. (2007). *Strategic planning of hinterland container terminals: a simulation based procedure*. Proceedings of the GI Jahrestagung 2007. Bremen, Alemania. pp. 425-428.
- Grunow, M., Günther, H.O., Lehmann, M. (2006). *Strategies for dispatching AGVs at automated seaport container terminals*. OR Spectrum, Vol. 28, No. 4, pp. 587-610.
- Günther, H.O. y Kim, K.H. (2006). *Container terminals and terminal operations*. OR Spectrum, Vol. 28, No. 4, pp. 437-445.
- Ha, J. y Wang, J. (2008). *Management Decision on the container terminal logistics based on Witness simulation*. Proceedings of the 4th International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing (WiCOM). Dalian, China. pp. 4
- Han, Y., Lee, L.H., Chew, E.P. y Tan, K.C. (2008). *A yard storage strategy for minimizing traffic congestion in a marine container transshipment hub*. OR Spectrum, Vol. 30, No. 4, pp. 697-720.
- Henesey, L., Davidsson, P. y Persson, J.A. (2009). *Agent based simulation architecture for evaluating operational policies in transshipping containers*. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, Vol. 18, No. 2, pp. 220-238.
- Hillier, F.S. y Lieberman, G.J. (2010). *Introduction to operations research*. 9ª edición. McGraw-Hill, Boston (Estados Unidos). ISBN 978-0071267670.
- Hou, J., Zhang, L. y Cui, P. (2006). *Simulation studies of truck configuration in a container terminal*. Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, China. pp. 6217-6221.
- Huang, S.Y., Hsu, W., Chen, C., Ye, R. y Nautiyal, S. (2008). *Capacity analysis of container terminals using simulation techniques*. International Journal of Computer Applications in Technology, Vol. 32, No. 4, pp. 246-253.
- Huang, W.C., Kuo, T.C., Wu, C.T. y Kuo, C.C. (2012). *Port management improvement strategies based on simulation model*. Journal of Marine Science and Technology, Vol. 20, No. 5, pp. 492-507.
- Hyster (2012). *Productos – Gama de productos – Máquinas grandes (8-48T)*. <<http://www.hyster.com/Europe/es-ES/Products/Home.htm>>. En Internet 3/7/2012.

- IANA (2012). *IANA North American Intermodal Facilities Directory*. <<http://www.intermodal.org/skedz/index.php>>. En Internet 7/6/2012.
- INE (2012). *Instituto Nacional de Estadística/ INEbase / Servicios / Transporte y actividades conexas, comunicaciones*. <http://www.ine.es/inebmenu/mnu_transporte.htm>. En Internet 1/3/2012.
- IQ (2000). *IQ – Intermodal Quality. Final report. European project (4th RTD Framework Programme)*. <<http://www.transport-research.info/Upload/Documents/200310/iq.pdf>>. En Internet 1/3/2012.
- Janic, M., Regglani, A. y Nijkamp, P. (1999). *Sustainability of the European freight transport system: evaluation of innovative bundling networks*. Transportation Planning and Technology, Vol. 23, No. 2, pp. 19-156.
- Jiang, X., Lee, L.H., Chew, E.P., Han, Y. y Tan, K.C. (2012). *A container yard storage strategy for improving land utilization and operation efficiency in a transshipment hub port*. European Journal of Operational Research, Vol. 221, No. 1, pp. 64–73.
- Kang, J., Ryu, K.R. y Kim, K.H. (2006). *Deriving stacking strategies for export containers with uncertain weight information*. Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 17, No. 4, pp. 399-410.
- Kavicka, A. y Klima, V. (1999). *Simulation model of marshalling yard Linz Vbf (Austria)*. Proceedings of the International Conference on Harbour, Maritime & Industrial Logistics Modelling and Simulation (HMS 1999). Génova, Italia. pp. 3.
- Kellner, M., Boysen, N. y Flidner, M. (2010). *How to park freight trains on rail-rail transshipment yards: the train location problem*. Jena Research Papers in Business and Economics, Working and Discussion Paper Series, School of Economics and Business Administration, Universidad Friedrich Schiller de Jena (Alemania). ISSN 1864-3108.
- Kelton, W.D. (2007). *Simulation with Arena*. 4ª edición. McGraw-Hill, Boston (Estados Unidos). ISBN 0071106855.
- Kemme, N. (2012). *Effects of storage block layout and automated yard crane systems on the performance of seaport container terminals*. OR Spectrum, Vol. 34, No. 3, pp. 563-591.
- Khoshnevis, B. (1994). *Discrete systems simulation*. 1ª edición. McGraw-Hill, Nueva York (Estados Unidos). ISBN 0-07-833302-4.

- Kia M., Shayan E. y Ghotb F. (2002). *Investigation of port capacity under a new approach by computer simulation*. Computers and Industrial Engineering, Vol. 42, No. 2, pp. 533-540.
- Kim, K.H. y Kim, H.B (1999). *Segregating space allocation models for container inventories in port container terminals*. International Journal of Production Economics, Vol. 59, No. 1-3, pp. 415-423.
- Kleijnen, J.P.C. (1995). *Verification and validation of simulation models*. European Journal of Operational Research, Vol. 82, No. 1, pp. 145-162.
- Klima, V., Kavicka, A. y Adamko, N. (2001). *Software tool VIRTUOS - Simulation of railway station operation*. Proceedings of the European Simulation Multiconference 2001 (ESM´2001). Praga, República Checa. pp. 84-88.
- Koh, P-H., Goh, J.L.K., Ng, H-S. y Ng, H-C. (1994). *Using simulation to preview plans of a container port operations*. Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference (WSC 1994). Orlando, FL, Estados Unidos. pp. 1109-1115.
- Konecrane (2012). *Productos – Grúas de puerto y carretillas elevadoras*. <<http://www.konecranes.com/portal/spa/productos/>>. En Internet 3/7/2012.
- Kozan, E. (1997a). *Comparison of analytical and simulation planning models of seaport container terminals*. Transportation Planning and Technology, Vol. 20, No. 3, pp. 235-248.
- Kozan, E. (1997b). *Increasing the operational efficiency of container terminals in Australia*. Journal of the Operational Research Society, Vol. 48, No. 2, pp. 151-161.
- Kozan, E. (2000). *Optimising container transfers at multimodal terminals*. Mathematical and Computer Modelling, Vol. 31, No. 10-12, pp. 235-243.
- Kozan, E. (2006). *Optimum capacity for intermodal container terminals*. Transportation Planning and Technology, Vol. 29, No. 6, pp. 471-482.
- Kulick, B.C. y Sawyer, J.T. (1999). *A flexible interface and architecture for container and intermodal freight simulations*. Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference (WSC 1999). Phoenix, AZ, Estados Unidos. pp. 1238-1242.
- Kulick, B.C. y Sawyer, J.T. (2001). *The use of simulation to calculate the labor requirements in the intermodal rail terminal*. Proceedings of the 2001 Winter

- Simulation Conference (WSC 2001). Arlington, VA, Estados Unidos. pp. 1038-1041.
- Law, A.M. (2007). *Simulation modeling and analysis*. 4ª edición. McGraw-Hill, Boston (Estados Unidos). ISBN 978-0071255196.
 - Lee, B.K., Jung, B.J., Kim, K.H., Park, S.O. y Seo, J.H. (2006a). *A simulation study for designing a rail terminal in a container port*. Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference (WSC 2006). Monterey, CA, Estados Unidos. pp. 1388-1397.
 - Lee, L.H., Chew, E.P., Tan, K.C. y Han, Y. (2006b). *An optimization model for storage yard management in transshipment hubs*. OR Spectrum, Vol. 28, No. 4, pp. 539-561.
 - León, M. (1999). *Diccionario del tren: vocabulario de términos ferroviarios definidos en español con traducción al alemán, francés, inglés, italiano y portugués*. 1ª edición. Luna, Madrid (España).
 - Liang, L., Lu, Z. y Zhou, B. (2009). *A heuristic algorithm for integrated scheduling problem of container handling system*. Proceedings of the 2009 International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE39). Troyes, Francia. pp. 40-45.
 - Lin, E. y Cheng, C. (2009). *Yardsim: a rail yard simulation framework and its implementation in a major railroad in the U.S.* Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC 2009). Austin, TX, Estados Unidos. pp. 2532-2541.
 - Lin, E. y Cheng, C. (2011). *Simulation and analysis of railroad hump yards in North America*. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC 2011). Phoenix, AZ, Estados Unidos. pp. 3710-3718.
 - Liu, C.-I., Julia, H. y Ioannou, P.A. (2002). *Design, simulation, and evaluation of automated container terminals*. IEEE Transaction on Intelligent Transportation Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 12-26.
 - Liu, Y. y Takakuwa, S. (2011). *Modeling the materials handling in a container terminal using electronic real-time tracking data*. Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (WSC 2011). Phoenix, AZ, Estados Unidos. pp. 1596-1604.
 - Longo, F., Mirabelli, G., Bocca, E., Briano, E. y Brandolini, M. (2006). *Container terminal scenarios analysis and awareness through modeling and simulation*.

- Proceedings of the 20th European Conference on Modelling and Simulation. Bonn, Alemania. pp. 619-624.
- Lowe, D. (2005). *Intermodal freight transport*. 1ª edición. Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford (Reino Unido). ISBN 978-0750659352.
 - Macharis, C. y Bontekoning, Y.M. (2004). *Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review*. European Journal of Operational Research, Vol. 153, No. 2, pp. 400-416.
 - Marín Martínez, F., García Gutiérrez, I., Ortíz Oliveira, A. y Arreche Bedia, L.M. (2004). *Gantry crane operations to transfer containers between trains: a simulation study of a Spanish terminal*. Transportation planning and technology, Vol. 27, No. 4, pp. 261-284.
 - Marinov, M., Şahin, I., Ricci, S. y Vasic-Franklin, G. (2013). *Railway operations, time-tabling and control*. Research in Transportation Economics, Vol. 41, No. 1, pp. 59-75.
 - Marinov, M. y Viegas, J. (2009). *A simulation modelling methodology for evaluating flat-shunted yard operations*. Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 17, No. 6, pp. 1106-1129.
 - Marinov M. y Viegas J. (2011). *Analysis and evaluation of double-ended flat-shunted yard performance employing two yard crews*. Journal of Transportation Engineering, Vol. 137, No. 5, pp. 319-326.
 - Merkuryev, Y., Tolujew, J., Blümel, E., Novitsky, L., Ginters, E., Viktorova, E., Merkuryeva, G. y Pronins, J. (1998). *A modelling and simulation methodology for managing the Riga harbour container terminal*. Simulation, Vol. 71, No. 2, pp. 84-95.
 - Middelkoop, D. y Bouwman, M. (2001). *Simone: large scale train network simulations*. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference (WSC 2001). Arlington, VA, Estados Unidos. pp. 1042-1047.
 - Ministerio de Fomento (2011). *Observatorio del transporte intermodal terrestre y marítimo. Documento final. 3 de Junio de 2011*. <http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/0E8318C5-2563-47B1-8FA6-F0D11D196AFD/103643/OBSERVATORIO_Documento_Final.pdf>. En Internet 31/7/2012.

- Ministerio de Fomento (2012a). *Análisis, información y divulgación sobre la aportación del transporte por carretera a la intermodalidad*. <http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/TRANSPORTE_POR_CARRETERA/TRANSPORTE_INTERMODAL/>. En Internet 7/3/2012.
- Ministerio de Fomento (2012b). *Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT)*. <http://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/ESPECIALES/PEIT/>. En Internet 2/3/2012.
- Ministerio de Fomento (2012c). *Propuesta española para la red transeuropea de transporte*. <<http://www.lamoncloa.gob.es/NR/rdonlyres/27933F36-3AEA-4115-A025-244493F75880/179396/111019MapasRedesTranseuropeasTransportes.pdf>>. En Internet 2/3/2012.
- Ministerio de Fomento (2012d). *Revisión de la red transeuropea de transportes. La Unión Europea acepta la propuesta del Gobierno de España sobre redes transeuropeas de transporte*. <<http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/12FF03D0-599F-46B7-8DAB-89DD681E28FD/106834/11101902.pdf>>. En Internet 2/3/2012.
- Nguyen, V.D., Won, S.H., Jeon, S.M., Lee, B.K., Jung, D.H. y Kim, K.H. (2006). *Automatic generation of simulation models for container terminals*. Proceedings of the 7th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference. Bangkok, Tailandia. pp. 1256-1264.
- Notteboom, T. (2008). *Bundling of freight flows and hinterland network developments*. The future of intermodal freight transport: operations, design and policy. 1ª edición. Edward Elgar, Cheltenham (Reino Unido). ISBN 978-1-84542-238-7.
- NTC Australia (2012). *Supply chain reform*. <<http://www.ntc.gov.au/viewpage.aspx?documentid=1762>>. En Internet 8/6/2012.
- Pardo, L. y Valdés, T. (1987). *Simulación: aplicaciones prácticas en la empresa*. 1ª edición. Díaz de Santos, Madrid (España). ISBN 8486251591.

- Park, T., Choe, R., Min Ok, S. y Ryu, K.R. (2010). *Real-time scheduling for twin RMGs in an automated container yard*. OR Spectrum, Vol. 32, No. 3, pp. 593-615.
- Parola, F. y Sciomachen, A. (2005). *Intermodal container flows in a port system network: analysis of possible growths via simulation models*. International Journal of Production Economics, Vol. 97, No. 1, pp. 75-88.
- Pérez Herrero, M. (2001). *Manual técnico del almacenaje*. 1ª edición. Mecalux, Barcelona (España). IBSN B-25320-2001.
- Petering, M.E.H. (2011). *Decision support for yard capacity, fleet composition, truck substitutability, and scalability issues at seaport container terminals*. Transportation Research, Part E (Logistics and Transportation Review), Vol. 47, No. 1, pp. 85-103.
- Pidd, M. y Castro, R.B. (1998). *Hierarchical modular modelling in discrete simulation*. Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference (WSC 1998). Washington, DC, Estados Unidos. pp. 383-389.
- Pidd, M. (2003). *Tools for thinking: modelling in management science*. 2ª edición. John Wiley & Sons, West Sussex (Inglaterra). ISBN 0-470-84795-6.
- Pidd, M. (2004). *Computer simulation in management science*. 5ª edición. John Wiley & Sons, Baffins Lane, Chichester (Inglaterra). ISBN 0-470-09230-9.
- Preston, P. y Kozan, E. (2001). *An approach to determine storage locations of containers at seaport terminals*. Computers & Operations Research, Vol. 28, No. 10, pp. 983-995.
- PROMIT (2009). *PROMIT - Promoting Innovative Intermodal Freight Transport. D 3.1-3.3 Best practice year 1, 2 and 3. European project (6th RTD Framework Programme)*. http://www.promit-project.net/UploadedFiles/Deliverables/PROMIT_BPH3_April09_cp_MSR.pdf. En Internet 1/3/2012.
- Puertos del Estado (2012). *Información general - El sistema portuario español*. <http://www.puertos.es/>. En Internet 7/6/2012.
- Qube Logistics (2012). *Strategically located facilities*. <http://www.pota.com.au/locations>. En Internet 8/6/2012.

- Ramani, K.V. (1996). *An interactive simulation model for the logistics planning of container operations in seaports*. Simulation, Vol. 66, No. 5, pp. 291-300.
- Rashidi, H. y Tsang, E.P.K. (2013). *Novel constraints satisfaction models for optimization problems in container terminals*. Applied Mathematical Modelling, Vol. 37, No. 6, pp. 3601-3634.
- RENFE Operadora (2007). *Sistemas de información de RENFE - Mercancías*. <<http://www.fundacion.valenciaport.com/Articles/doc/presentations/20070614-Sistemas-de-Informacion-de-RENFEE2%80%93Merca.aspx>>. En Internet 5/6/2012.
- RENFE Operadora (2011). *Ejercicio 2010. Informe económico y de actividad*. <http://www.renfe.com/docs/Economico_2010_cast.pdf>. En Internet 12/3/2012.
- RENFE Operadora (2012a). *Mercancías*. <<http://www.renfe.com/empresa/mercancias/index.html>>. En Internet 12/3/2012.
- RENFE Operadora (2012b). *Mercancías. Contren. Barcelyon Express*. <<http://www.contrenrenfe.com/barcelyon.html>>. En Internet 31/7/2012.
- RENFE Operadora (2012c). *Mercancías. Contren. Parque de material. Vagones*. <<http://www.contrenrenfe.com/vagones.html>>. En Internet 31/7/2012.
- RENFE Operadora (2012d). *Mercancías. Contren. Red Multicliente. Guía de servicios multicliente*. <http://www.contrenrenfe.com/red_multicliente.html>. En Internet 31/7/2012.
- RENFE Operadora (2012d). *Mercancías. Servicios. Serv. Telemáticos. Condiciones generales de uso y facturación a través de ContainerClick*. <http://www.contrenrenfe.com/pdf/CONTREN_ContainerClick4%202%202_2.pdf>. En Internet 5/6/2012.
- Rizzoli, A.E., Fornara, N. y Gambardella, L.M. (2002). *A simulation tool for combined rail/road transport in intermodal terminals*. Mathematics and Computers in Simulation, Vol. 59, No. 1-3, pp. 57-71.
- Robinson, S. (2004). *Simulation: the practice of model development and use*. 1ª edición. John Wiley & Sons, West Sussex (Inglaterra). ISBN 978-0470847725.

- Rotter, H. (2004). *New operating concepts for intermodal transport: the mega hub in Hanover/Lehrte in Germany*. Transportation Planning and Technology, Vol. 27, No. 5, pp. 347-365.
- Saanen, Y.A. y Valkengoed, M.V. (2005). *Comparison of three automated stacking alternatives by means of simulation*. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference (WSC 2005). Orlando, FL, Estados Unidos. pp. 1567-1576.
- Sargent, R.G. (2010). Verification and validation of simulation models. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference (WSC 2010). Baltimore, MD, Estados Unidos. pp. 166-183.
- Sarosky, T. y Wilcox, T. (1994). *Simulation of a railroad intermodal terminal*. Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference (WSC 1994). Orlando, FL, Estados Unidos. pp. 1233-1238.
- Saurí, S. y Martín, E. (2011). *Space allocating strategies for improving import yard performance at marine terminals*. Transportation Research, Part E (Logistics and Transportation Review), Vol. 47, No. 6, pp. 1038-1057.
- Sgouridis, S.P. y Angelides D.C. *Simulation-based analysis of handling inbound containers in a terminal*. Proceedings of the 2002 Winter Simulation Conference. San Diego, Estados Unidos. Vol. 2, pp. 1716-1724.
- Shabayek, A.A. y Yeung, W.W. (2002). *A simulation model for the Kwai Chung container terminals in Hong Kong*. European Journal of Operational Research, Vol. 140, No. 1, pp. 1-11.
- Stahlbock, R. y Voß, S. (2008). *Operations research at container terminals: a literature update*. OR Spectrum, Vol. 30. No. 1, pp. 1-52.
- Steenken, D., Voss, S. y Stahlbock, R. (2004). *Container terminal operation and operations research-a classification and literature review*. OR Spectrum, Vol. 26, No. 1, pp. 3-49.
- Tahar, R.M. y Hussain, K. (2000). *Simulation and analysis for the Kelang Container Terminal operations*. Logistics Information Management, Vol. 13, No. 1, pp. 14-20.
- TERCAT (2012). *Terminal Catalunya, S.A. Gallery. Yard operations*. <<http://www.tercat.es/>>. En Internet 14/3/2012.

- TEREX Cranes (2012). *Productos. Equipamiento nuevo*. <<http://www.terex-cranes.com/es/products/newequipment/index.htm>>. En Internet 14/3/2012.
- Terminali Italia (2012). *Terminali Italia. Gruppo Ferrovie dello Stato. I terminali*. <<http://www.terminaliitalia.it/cms/v/index.jsp?vnextoid=6872ae121b5d0210VgnVCM10000080a3e90aRCRD>>. En Internet 2/11/2012.
- Trafalquar (2012). *TBA Simulation Emulation Software. Tools. Trafalquar: strategic terminal development*. <<http://www.tba.nl/index.php?mid=28&lang=en>>. En Internet 31/7/2012.
- Triple Crown Services (2012). *RoadRailer Fleet. Bi-Modal transportation*. <<http://www.triplecrownsvc.com/Bimodal.html>>. En Internet 7/6/2012.
- Yin, R.K. (2003). *Case study research: design and methods*. 3ª edición. Sage, Thousand Oaks (California). ISBN 0761925538.
- Yun, W.Y. y Choi, Y.S. (1999). *A simulation model for container-terminal operation analysis using an object-oriented approach*. International Journal of Production Economics, Vol. 59, No. 1-3, pp. 221-230.
- Vasilis Vasiliasukas, A. y Kabashkin, I. (2006). *Analysis of indicators measuring performance of rail-road terminals*. Transport Means 2006: Proceedings of the 10th International Conference. Kaunas, Lituania. pp. 93-96.
- Verschuren, P. (2003). *Case study as a research strategy: some ambiguities and opportunities*. International Journal of Social Research Methodology, Vol. 6, No. 2, pp. 121-139.
- Vía Libre (2008a). *Adif experimenta tráfico mercantes con trenes de seiscientos metros*. Vía Libre. La revista del ferrocarril. Editada por la Fundación de Ferrocarriles Españoles. <<http://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?cs=infr¬=2858>>. En Internet 6/7/2012.
- Vía Libre (2008b). *El "Container Click" estará disponible el 15 de octubre*. Vía Libre. La revista del ferrocarril. Editada por la Fundación de Ferrocarriles Españoles. <<http://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?cs=infr¬=2858>>. En Internet 6/7/2012.
- Vía Libre (2009). *Renfe ultima la puesta en marcha de trenes de mercancías de seiscientos metros de longitud*. Vía Libre. La revista del ferrocarril. Editada por la Fundación de Ferrocarriles Españoles. <<http://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=3099&cs=oper>>. En Internet 6/7/2012.

- Vía Libre (2011). *Mercancías de Renfe reorganizada en tres sociedades especializadas por mercados*. Vía Libre. La revista del ferrocarril. Editada por la Fundación de Ferrocarriles Españoles. <<http://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=7289&cs=oper>>. En Internet 23/7/2012.
- Vis, I.F.A. (2006). *A comparative analysis of storage and retrieval equipment at a container terminal*. International Journal of Production Economics, Vol. 103, No. 2, pp. 680–693.
- Vis, I.F.A. y Koster, R. de (2003). *Transshipment of containers at a container terminal: an overview*. European Journal of Operational Research, Vol. 147. No. 1, pp. 1-16.
- Vis, I.F.A. y van Anholt, R.G. (2010). *Performance analysis of berth configurations at container terminals*. OR Spectrum, Vol. 32, No. 3, pp. 453-476.
- Wabash National (2012). *Products. Intermodal. RoadRailer®*. <<http://www.wabashnational.com/Intermodal.htm>>. En Internet 7/6/2012.
- Weigel, M.L. (1994). *A railroad intermodal capacity model*. Proceedings of the 1994 Winter Simulation Conference (WSC 1994). Orlando, FL, Estados Unidos. pp. 1229-1232.
- Wiegmans, B.W., Masurel, E. y Nijkamp, P. (1999). *Intermodal freight terminals: an analysis of the terminal market*. Transportation Planning and Technology, Vol. 23, No. 2, pp. 105-128.
- Wiegmans, B.W., Stekelenburg, D.T., Versteegt, C. y Bontekoning, Y.M. (2007). *Modeling rail-rail exchange operations: an analysis of conventional and new-generation terminals*. Transportation Journal, Vol. 46, No. 4, pp. 5-20.
- Wiese, J., Suhl, L. y Kliewer, N. (2009). *Mathematical programming and simulation based layout planning of container terminals*. International Journal of Simulation and Process Modelling, Vol. 5, No. 4, pp. 313-323.
- Witness (2004). *Witness, technology for knowing. Manufacturing Performance Edition. Tutorial Manual*. Lanner Group Ltd, Redditch Worcs (Reino Unido). Referencia 2004/1/TUT.
- Wong, A. y Kozan, E. (2010). *Optimization of container process at seaport terminals*. Journal of the Operational Research Society, Vol. 61, No. 4, pp. 658-665.

- Woxenius, J. y Barthel, F. (2008). *Intermodal road-rail transport in the European Union*. The future of intermodal freight transport: operations, design and policy. 1ª edición. Edward Elgar, Cheltenham (Reino Unido). ISBN 978-1-84542-238-7.
- Zeng, Q. y Yang, Z. (2007). *A two-phase tabu search approach to scheduling optimization in container terminals*. Journal of Marine Science and Application, Vol. 6, No. 2, pp. 44-50.
- Zhang, H.-L. y Jiang, Z.-B. (2008). *Simulation studies of heuristic approaches for dynamic scheduling of container terminal operations*. International Journal of Modelling and Simulation, Vol. 28, No. 4, pp. 410-422.
- Zhang, C., Liu, L., Wan, Y., Murty, K.G. y Linn, R.J. (2003). *Storage space allocation in container terminals*. Transportation Research, Part B (Methodological), Vol. 37, No. 10, pp. 883-903.

Anexo A

GLOSARIO

A continuación, se presenta un glosario de términos utilizados a lo largo del documento. En el subapartado 2.5.2, se recoge más información sobre la terminología empleada para denominar a las infraestructuras y a los recursos existentes en las distintas terminales ferroviarias de contenedores a estudiar.

- **Administrador de infraestructuras ferroviarias:** agente del sector ferroviario encargado de construir nuevas infraestructuras ferroviarias (por ejemplo, terminales) y de gestionar su explotación.
- **Caja móvil:** unidad de carga reutilizable dotada de ciertos dispositivos que facilitan su trasbordo entre modos de transporte. Sus dimensiones se adaptan a las de los vehículos terrestres. No todas cuentan con la homologación de la Unión Internacional de Ferrocarriles para ser transportadas por ferrocarril.
- **Camión a cargar:** camión que llega a una terminal para retirar un contenedor que llegó previamente en tren.
- **Camión a descargar:** camión que llega a una terminal para dejar un contenedor que saldrá posteriormente en tren.
- **Camión entrante:** camión que llega a una terminal para ser cargado o descargado.
- **Camión saliente:** camión que sale de una terminal después de haber sido cargado o descargado.
- **Contenedor:** unidad de carga reutilizable dotada de ciertos dispositivos que facilitan su trasbordo entre modos de transporte. Existen contenedores de distintos tipos. Los contenedores terrestres cumplen las especificaciones de la Unión Internacional de Ferrocarriles para ser transportados por ferrocarril.
- **Contenedor a carga:** contenedor que será cargado, en una terminal, sobre un tren, un camión o un tractor con plataforma.
- **Contenedor a descargar:** contenedor que será descargado, en una terminal, de un tren, un camión o un tractor con plataforma.
- **Contenedor entrante a la red ferroviaria:** contenedor que llega a una terminal en camión/tractor con plataforma para salir, posteriormente, en tren.
- **Contenedor saliente de la red ferroviaria:** contenedor que llega a una terminal en tren para salir, posteriormente, en camión/tractor con plataforma.

- **Líneas de almacenamiento:** líneas, situadas de forma paralela a las vías de carga/descarga, donde los contenedores pueden ser apilados.
- **Modelo de simulación no flexible:** modelo creado para representar y estudiar un escenario particular. Es necesario modificar su código para simular un nuevo escenario.
- **Operador ferroviario:** agente del sector ferroviario encargado de transportar mercancías y/o pasajeros, en régimen de competencia con otras empresas. También puede encargarse del mantenimiento y de la fabricación de material ferroviario. Si no realiza envíos puerta a puerta, tendrá que estar en contacto con otros operadores logísticos para cerrar la cadena de transporte que conecta al cargador (persona que toma la decisión de realizar un envío de mercancía) con el destinatario (persona que recibe el envío).
- **Plan de trenes:** determina, entre otros aspectos, el día y la hora de entrada/salida de los trenes en/de una terminal. En el caso español, suele tener una periodicidad semanal.
- **Plataforma bimodal:** plataforma provista de un bogie desmontable o de un solo eje que puede ser utilizada como semirremolque de un camión o como plataforma de un tren.
- **Plataforma flexible de simulación:** generador de modelos de simulación que tiene preprogramadas distintas características (distintos tipos de elementos, distinto número de elementos de un mismo tipo, etc.) entre las que un decisor puede elegir, a través de una interfaz de usuario, para configurar un amplio rango de escenarios sin necesidad de cambiar su código inicial.
- **Playa de almacenamiento:** lugar, situado a unos metros de las vías de carga/descarga, donde los contenedores pueden ser apilados de forma longitudinal formando filas próximas entre sí.
- **Playa de carga/descarga de trenes y camiones/tractores con plataforma:** lugar, dentro de la zona de carga/descarga de una terminal ferroviaria, donde se almacenan contenedores, se intercambian contenedores entre modos y, si procede, se trasbordan contenedores entre trenes.
- **Semirremolque:** vehículo no motorizado empleado para el transporte de cajas móviles o de contenedores. Debe ser acoplado a otro vehículo motorizado que sustente parte de la carga que transporta.

- **Software específico:** software diseñado específicamente para simular terminales de transporte intermodal.
- **Software no específico:** software no diseñado específicamente para simular terminales de transporte intermodal.
- **Terminal ferroviaria:** lugar, dentro de una red dedicada al transporte intermodal de mercancías, donde se intercambian unidades de carga entre el ferrocarril y otros modos de transporte (carretera, marítimo y/o fluvial), además de poder realizar otras operaciones, como transferir unidades de carga entre trenes o formar trenes salientes a partir de la clasificación de las plataformas transportadas por otros trenes entrantes.
- **Terminal ferroviaria de clasificación:** terminal dedicada, principalmente, a clasificar las plataformas transportadas por trenes entrantes para formar nuevos trenes salientes.
- **TEU:** acrónimo del término inglés "Twenty Foot Equivalent Unit". Un TEU es una unidad de carga equivalente a un contenedor normalizado de 20 pies. De tal forma que un contenedor de 20 pies equivale a un TEU, un contenedor de 30 pies equivale a 1,5 TEUs y un contenedor de 40 pies equivale a 2 TEUs.
- **Toneladas-kilómetro:** unidad de medida del tráfico de mercancías que se obtiene tras multiplicar el número de toneladas transportadas por el número de kilómetros recorridos.
- **Tractor con plataforma:** vehículo automotor provisto de una plataforma porta contenedores que se utiliza para mover cajas móviles o contenedores entre las zonas de almacenamiento y las vías de carga/descarga de ciertas terminales ferroviarias o entre los subsistemas ferroviario y marítimo/fluvial (muelles, zonas de almacenamiento, etc.) que componen una terminal portuaria/fluvial.
- **Tractor con plataforma a cargar:** tractor con plataforma que llega al subsistema ferroviario de una terminal portuaria, procedentes de su subsistema marítimo o fluvial, para retirar un contenedor que llegó previamente en tren.
- **Tractor con plataforma a descargar:** tractor con plataforma que llega al subsistema marítimo o fluvial de una terminal portuaria, procedentes de su subsistema ferroviario, para dejar un contenedor que saldrá posteriormente en tren.

- **Transporte combinado:** concepto empleado por la Comisión Europea para identificar al transporte intermodal de mercancías entre estados miembros de la Unión Europea. En este caso, la carretera se utiliza para recorridos mínimos y el ferrocarril, las vías navegables interiores o el transporte marítimo para los recorridos principales.
- **Transporte intermodal:** movimiento de mercancías, agrupadas en una misma unidad de carga o vehículo, donde intervienen dos o más modos de transporte.
- **Tren a cargar:** tren que sale de una terminal con contenedores procedentes de otros modos de transporte o trenes.
- **Tren a descargar:** tren que llega a una terminal para dejar un conjunto de contenedores que saldrán posteriormente en otros modos de transporte o trenes.
- **Tren cliente:** tren que se adapta en recorrido, horario y composición a las necesidades de un único cliente. Estos trenes también reciben el nombre de "trenes completos".
- **Tren entrante:** tren que llega a una terminal para ser atendido en su zona de carga/descarga y/o de clasificación.
- **Tren multcliente:** tren que realiza un servicio regular entre dos terminales y que puede transportar unidades de carga pertenecientes a varios clientes.
- **Tren saliente:** tren que sale de una terminal después de haber sido atendido en su zona de carga/descarga y/o de clasificación.
- **Unidad de carga:** elemento empleado para agrupar y transportar mercancía. Las unidades de carga más utilizadas para el transporte intermodal son: el contenedor, la caja móvil y el semirremolque.
- **Zona de carga/descarga:** zona de una terminal ferroviaria donde se pueden almacenar contenedores, intercambiar contenedores entre modos y/o trasbordar contenedores entre trenes.
- **Zona de clasificación:** zona de una terminal ferroviaria donde se clasifican las plataformas transportadas por los trenes entrantes para formar nuevos trenes salientes.

Anexo B

INFORMACIÓN A CONFIGURAR EN LA INTERFAZ DE USUARIO

Este anexo presenta las distintas hojas de cálculo que componen la interfaz de usuario y los parámetros a configurar en cada una de ellas.

Hoja "Inicio_Configuracion"

Esta hoja describe la estructura de la interfaz de usuario, además de explicar qué pasos deben seguirse para configurar las características de la terminal ferroviaria de contenedores a simular.

Hoja "Demanda"

En esta hoja, se puede configurar:

- El plan de trenes entrantes. Para cada tren, debe definirse su origen (otra terminal ferroviaria de contenedores o una zona de la terminal a simular), destino (zona de carga/descarga o zona de clasificación de la terminal a simular), propietario, tipo (cliente/multicliente), semana de llegada, día de llegada, hora de llegada y composición. Para definir la composición de cada tren, es necesario determinar el número de plataformas de 60 pies que transporta y el número de contenedores transportados por cada plataforma. A su vez, es preciso determinar el tamaño de cada contenedor, su peso (cargado/vacío), su propietario y su posterior modo de salida de la terminal (camión, tractor con plataforma o tren). Si un contenedor sale en tren, debe indicarse, además, cuál es el tren saliente con el que está relacionado y la próxima plataforma donde será ubicado.
- El plan de trenes salientes. Al igual que para los trenes entrantes, para cada uno de los trenes salientes que compone el plan, debe definirse su origen (zona de carga/descarga o zona de clasificación de la terminal a simular), destino (otra terminal ferroviaria de contenedores o una zona de la terminal a simular), propietario, tipo (cliente/multicliente), semana de salida, día de salida, hora de salida y composición. Para definir la composición de cada tren, es necesario determinar el número de plataformas de 60 pies que transporta y el número de contenedores transportados por cada plataforma. A su vez, es preciso determinar el tamaño de cada contenedor, su peso (cargado/vacío) y su propietario. Si el tren sale de la zona de carga/descarga debe introducirse, además, un parámetro que lo relacione con el tren entrante que le cedió sus plataformas.
- El patrón de llegadas para los camiones a cargar relacionados con cada uno de los trenes entrantes. Según lo conceptualizado en el capítulo 5, pueden

utilizarse dos distribuciones para configurar este patrón. Para cada una de ellas, debe establecerse: qué proporción de camiones la siguen; la semana, el día y la hora a partir de la cuál comienzan a llegar camiones; el tiempo medio entre llegadas; y el procedimiento que se utilizará, en el modelo de simulación, para generar estas llegadas. Según las especificaciones proporcionadas por el usuario, las llegadas pueden ser generadas de forma determinista o aleatoria. En este último caso, el usuario puede elegir entre generar las llegadas a partir de una distribución exponencial o a partir de una distribución empírica.

- El patrón de llegadas para los tractores de maniobra a cargar relacionados con cada uno de los trenes entrantes. En este caso, los parámetros a configurar son similares a los establecidos para los camiones a cargar.
- El patrón de llegadas para los camiones a descargar relacionados con cada uno de los trenes salientes. En este caso, los parámetros a configurar son similares a los establecidos para los camiones a cargar.
- El patrón de llegadas para los tractores con plataforma a descargar relacionados con cada uno de los trenes salientes. En este caso, los parámetros a configurar son similares a los establecidos para los camiones a cargar.
- Sucesos aleatorios que afectan a la demanda anteriormente planificada. En este sentido, se puede definir:
 - La probabilidad de que un tren entrante pueda sufrir un adelanto/retraso respecto a su hora de llegada, así como los parámetros de la distribución normal truncada utilizada para generar este adelanto/retraso.
 - La probabilidad de que un contenedor que debería haber llegado en un tren entrante no haya sido cargado en la terminal de origen.
 - La probabilidad de que un tren entrante transporte más contenedores de lo planificado, junto a los parámetros de las distribuciones empíricas utilizadas para determinar el número de contenedores transportados en exceso y sus características.
 - La probabilidad de que un tren saliente sufra un retraso respecto a su hora de salida planificada por causas ajenas a la terminal a simular, así como los parámetros de la distribución normal truncada utilizada para generar este retraso.

- La probabilidad de que un contenedor que debe ser cargado en un tren saliente no llegue a la terminal a simular, a pesar de tener un servicio de transporte contratado.
- El tiempo máximo de estancia considerado como aceptable para los camiones/tractores con plataforma. Este parámetro será utilizado, a lo largo de la simulación, para evaluar si el nivel de servicio proporcionado por la terminal es adecuado.

Hoja "Zona_CD_Infra"

En esta hoja, se puede configurar:

- El número máximo de camiones/tractores con plataforma que pueden estar simultáneamente dentro de la terminal sin existir interferencias entre ellos.
- Si la terminal dispone o no de puertas de entrada/salida. En caso de existir, el usuario debe configurar el número de puertas existentes, la forma que tienen de operar (puertas dedicadas a la entrada/salida de camiones/tractores con plataforma o puertas dedicadas a una única función), los horarios de trabajo de cada puerta y el tiempo que tardan en atender un vehículo. Según lo conceptualizado en el capítulo 5, todos los tiempos de operación reflejados en la plataforma flexible de simulación pueden ser definidos mediante un valor determinista, una distribución de probabilidad triangular o una distribución de probabilidad empírica.
- Si la terminal dispone o no de área de aparcamiento para vehículos. En caso de existir, el usuario debe configurar el número máximo de vehículos que pueden estar esperando en ella de forma simultánea. Según lo conceptualizado en la Tabla 5.1, la plataforma flexible permite configurar terminales donde la capacidad de aparcamiento varía entre 0 y 30 camiones. Del mismo modo, esta tabla recoge el rango de variación de otras características de diseño mencionadas a lo largo de este anexo (número de puertas de entrada/salida, número de grúas móviles, número de vías de clasificación, etc.).
- El número de vías de entrada/salida que posee la zona de carga/descarga (una vía dedicada a la entrada/salida de trenes o una vía dedicada a cada una de estas funciones), los horarios durante los que se puede circular por ellas y el tiempo que un tren tarda en atravesarlas.

- Si la terminal dispone o no de vías de expedición/recepción. En caso de existir, el usuario debe configurar el número de vías de expedición/recepción que existen y su longitud.
- Si la terminal dispone de módulos de carga/descarga sin grúas pórtico. En caso de existir, el usuario debe configurar, para cada uno de los módulos existentes:
 - La familia de trenes que puede atender.
 - Las características de su playa de almacenamiento: largo, ancho, máxima altura de apilamiento y modo de operación preferente (almacenamiento en altura o almacenamiento en superficie).
 - La longitud de su vía de carga/descarga.
 - El número máximo de vehículos que pueden ser atendidos de forma simultánea cerca de la playa de almacenamiento y de la vía de carga/descarga.
- Si la terminal dispone de módulos de carga/descarga con grúas pórtico. En caso de existir, el usuario debe configurar, para cada uno de los módulos existentes:
 - La familia de trenes que puede atender.
 - Si existe playa de almacenamiento. En caso de existir, el usuario debe configurar sus características: largo, ancho, máxima altura de apilamiento y modo de operación preferente (almacenamiento en altura o almacenamiento en superficie).
 - El número de vías de carga/descarga existentes y su longitud.
 - Si existen líneas de almacenamiento. En caso de existir, el usuario debe configurar sus características: número de líneas dedicadas al almacenamiento de contenedores entrantes en la red ferroviaria que existe a cada uno de los lados del haz de vías de carga/descarga, número de líneas dedicadas al almacenamiento de contenedores salientes que existe a cada uno de los lados del haz de vías de carga/descarga y posibilidad de acceso de las grúas móviles, si existen, a cada uno de los lados del haz de vías de carga/descarga y a cada uno de los tipos de líneas de almacenamiento. En caso de estar simulando un módulo de carga/descarga con playa de almacenamiento y líneas

dedicadas al almacenamiento de contenedores salientes, el usuario debe configurar, además, el porcentaje de saturación de estas líneas que desencadena el movimiento de contenedores hacia la playa de almacenamiento, con el objetivo de evitar que el proceso de descarga de trenes se paralice.

- El número máximo de vehículos que pueden ser atendidos de forma simultánea cerca de la playa de almacenamiento y de las vías de carga/descarga.
- El número de grúas pórtico existente, los horarios de trabajo de cada grúa, sus tasas de averías y sus tareas de reparación.
- Los horarios dentro de los cuáles puede realizarse la retirada/colocación de locomotoras y las inspecciones de los trenes (inspecciones previas a la descarga de un tren, previas a su carga y previas a su salida), junto al tiempo que se tarda en realizar cada una de estas operaciones.
- La estrategia a seguir para formar trenes salientes. Según lo conceptualizado en el capítulo 5, el usuario puede elegir qué trenes salientes serán cargados tan pronto como estén disponibles sus plataformas y qué trenes salientes comenzarán a ser cargados cierto tiempo antes de su salida de la terminal. Del mismo modo, el usuario puede configurar la antelación respecto a su instante de salida con la que debe ser preparada la salida de los trenes de la terminal.
- Las distancias que existen entre cada una de las infraestructuras que posee la zona de carga/descarga.

Hoja "Zona_CD_GP"

En esta hoja, se puede configurar el tiempo que tarda una grúa pórtico en: extraer un contenedor de un vehículo, colocar un contenedor en un vehículo, extraer un contenedor de un tren, colocar un contenedor en un tren, extraer un contenedor de una línea de almacenamiento y colocar un contenedor en una línea de almacenamiento. En esta tesis, se ha supuesto que todas las grúas pórtico que trabajan en la terminal a simular tienen los mismos tiempos de operación.

Hoja "Zona_CD_GM"

En esta hoja, se puede configurar:

- El número de grúas móviles existente.

- Los horarios de trabajo de cada grúa móvil.
- Las tasas de averías y de reparación para cada grúa móvil.
- Las zonas de trabajo de cada grúa móvil.
- El tiempo que tarda una grúa móvil en: extraer un contenedor de un vehículo, colocar un contenedor en un vehículo, extraer un contenedor de un tren, colocar un contenedor en un tren, extraer un contenedor de la playa de almacenamiento, colocar un contenedor en la playa de almacenamiento, extraer un contenedor de una línea de almacenamiento y colocar un contenedor en una línea de almacenamiento. Al igual que para las grúas pórtico, en esta tesis, se ha supuesto que todas las grúas móviles que trabajan en la terminal a simular tienen los mismos tiempos de operación.
- La velocidad a la que pueden circular las grúas móviles por cada tramo de la terminal.

Hoja "Zona_Clasif"

En esta hoja, se puede configurar si la terminal dispone de zona de clasificación. En caso existir, el usuario debe definir:

- El número de vías de entrada/salida que posee la zona de clasificación (una vía dedicada a la entrada/salida de trenes o una vía dedicada a cada una de estas funciones), los horarios durante los que se puede circular por ellas y el tiempo que un tren tarda en atravesarlas.
- El número de vías de clasificación existentes y su longitud.
- Los horarios dentro de los cuáles puede realizarse la retirada/colocación de locomotoras y las inspecciones de los trenes (inspecciones previas a la clasificación de los trenes y previas a su salida), junto al tiempo que se tarda en realizar cada una de estas operaciones.
- El número máximo de operaciones de retirada/colocación de locomotoras, inspecciones y clasificaciones de plataformas que pueden realizarse en paralelo sin interferir entre sí.
- Las distancias que existen entre cada una de las infraestructuras que posee la zona de clasificación, así como las distancias que existen entre la zona de clasificación y la zona de carga/descarga (si existe).

Hoja "TractoresM"

En esta hoja, se puede configurar:

- El número de tractores de maniobra existente.
- Los horarios de trabajo de cada tractor de maniobra.
- Las tasas de averías y de reparación para cada tractor de maniobra.
- Las zonas de trabajo de cada tractor de maniobra.
- El tiempo que tarda un tractor en engancharse a un conjunto de plataformas y en desengancharse de un conjunto de plataformas. Al igual que para las grúas, en esta tesis, se ha supuesto que todos los tractores de maniobra que trabajan en una terminal tienen los mismos tiempos de operación.
- La velocidad a la que pueden circular los tractores de maniobra por cada tramo de la terminal.

Hoja "Fin_Configuracion"

En esta hoja, se puede configurar:

- El tiempo durante el cual se simulará el escenario definido en hojas anteriores.
- El tiempo de calentamiento que se aplicará antes de comenzar a recoger resultados sobre las variables de salida del modelo.